

NAMUR  
1960

2

*Cybernetica*

ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CYBERNÉTIQUE  
INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR CYBERNETICS

Sous la Présidence d'honneur de M. le Gouverneur de la Province de Namur

Conseil d'Administration  
*Board of Administration*

PRÉSIDENT :

M. Georges R. BOULANGER (Belgique), Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons et à l'Université Libre de Bruxelles.

MEMBRES :

MM. René CLOSE (Belgique), Avocat.

Louis COUFFIGNAL (France), Inspecteur Général de l'Instruction Publique, Directeur du Laboratoire de Calcul Mécanique de l'Institut Blaise Pascal, Paris.

John DIEBOLD (U.S.A.), President of John Diebold and Associates, Inc., New York.

W. Ross ASHBY (United Kingdom), M.D., D.P.M., Director of the Burden Neurological Institute, Bristol.

ADMINISTRATEUR-DÉLÉGUÉ :

M. Josse LEMAIRE (Belgique), Directeur de l'Office Économique, Social et Culturel de la Province de Namur.

CYBERNETICA

est la revue de l'Association Internationale de Cybernétique.

Elle paraît 4 fois par an.

*is the review of the International Association for Cybernetics.*

*It is issued four times a year.*

---

*Prix et conditions de vente — Price and conditions of sale.*

Abonnement annuel — *Yearly subscription :*

membres de l'Association	150,- F. B.
<i>members of the Association</i>	150,- F. B.
non-membres :	300,- F. B.
<i>non-members :</i>	300,- F. B.

Par numéro — *Each number :*

membres de l'Association	50,- F. B.
<i>members of the Association</i>	50,- F. B.
non-membres :	100,- F. B.
<i>non-members :</i>	100,- F. B.

Toute correspondance concernant la revue est à adresser à l'Association Internationale de Cybernétique, 13, rue Basse Marcelle, Namur (Belgique).

*All correspondence concerning the review is to be sent to the International Association for Cybernetics, 13, rue Basse Marcelle, Namur (Belgium).*

Secrétaire de Rédaction : M. Roger DETRY

# CYBERNETICA

VOLUME III

N° 2 - 1960

Revue de l'Association Internationale de Cybernétique  
Review of the International Association for Cybernetics

NAMUR

Les articles sont rédigés en français ou en anglais au choix de leurs auteurs. Ils n'engagent que ces derniers.

La reproduction intégrale ou abrégée des textes parus dans la revue est interdite sans autorisation spéciale de l'Association Internationale de Cybernétique.

---

*The papers are written in English or in French according to the choice of their authors and on their own responsibility.*

*The complete or the partial reproduction of the papers printed in the review is forbidden without special authorization of the International Association for Cybernetics.*




# SOMMAIRE

## CONTENTS

MAURICE CARTON : <i>Un procédé de mécanisation de la géométrie</i> .....	83
REGINALD J. GOLDACRE : <i>The control of rhythm and homeostasis in biology and medicine</i> .....	117
LUCIEN MEHL : <i>Les sciences juridiques devant l'automation</i> (suite) ....	142

---



Digitized by the Internet Archive  
in 2024

# Un procédé de mécanisation de la géométrie

par Maurice CARTON,

*Docteur en Sciences Mathématiques,  
Professeur à l'Institut Supérieur de Commerce Warocqué de Mons*

---

*Au 2<sup>me</sup> Congrès International de  
Cybernétique, organisé à Namur,  
du 3 au 10 septembre 1958, par  
l'Association Internationale de Cyber-  
nétique, M. Maurice Carton dans une  
communication intitulée « La méca-  
nisation des méthodes géométriques »  
jetait les bases d'une machine capable  
d'établir et de démontrer des théorèmes  
de la géométrie.*

*Il va sans dire que cette nouvelle  
adaptation d'une théorie mathéma-  
tique aux systèmes asservis élargira  
sensiblement le champ d'application  
déjà si vaste de la cybernétique. Le  
lecteur trouvera dans le présent exposé  
les principes détaillés de cette adapta-  
tion.*

## INTRODUCTION

Un raisonnement rigoureux, formé d'une succession de syllogismes en chaîne ou en réseau, à prémisses simples ou multiples, n'offre pour sa mécanisation, aucune difficulté de principe. Encore faut-il que ce raisonnement soit parfaitement explicité, rigoureusement construit, totalement éclairci.

La géométrie, dans son édification, passe à juste titre pour une

construction logique exemplaire. Pourtant, à l'examen rationnel, de nombreux éléments provenant tant du raisonnement que des concepts de base eux-mêmes sur lesquels s'élabore une théorie géométrique, demeurent confus ou même douteux. Nous ne citerons pour exemple que la méthode de récurrence pour le raisonnement et de la notion de l'infini pour les concepts. Car si, par exemple, il est aisé d'affirmer que l'infini est une convention de langage, il n'est pas facile d'établir la relation de principe existant entre cette notion et le nombre de points situés sur une droite, celle-ci comprenant, en effet, une infinité de points.

L'article exposé dans le présent bulletin montre comment l'enchaînement traditionnel des propositions de la géométrie peut être, par un bouleversement complet des principes de base, adapté aux possibilités des machines automatiques. C'est ainsi, par exemple, que la définition de circonférence précède celle de l'égalité des segments de droites, cette égalité étant réalisée lorsque les segments auxquels elle se rapporte peuvent s'adapter aux rayons d'une même circonférence.

Pour la clarté de l'exposé, la représentation matricielle des propositions géométriques a été adoptée. Cela ne signifie pas, bien entendu, que cette représentation doit être comprise sous sa forme absolue. Elle peut tout aussi bien représenter un tableau de connexion d'une machine statique ou un embryon d'organigramme pour l'adaptation des raisonnements aux ordinatrices. La matière faisant l'objet de ce présent exposé a donc un caractère souple et permet une adaptation libre du raisonnement « géométrique » aux éléments cybernétiques matériellement concevables. Et puisque nous avons mentionné les ordinatrices, précisons que l'adaptation de la géométrie à ces machines n'offre aucune difficulté en soi si ce n'est une lenteur exagérée du déroulement des opérations dû au caractère essentiellement séquentiel et universel de ces machines.

## CHAPITRE I

### UNE GÉOMÉTRIE « MÉCANISABLE »

#### 1) *L'état actuel de la géométrie.*

La conception actuelle que l'on se fait généralement de la géométrie est celle d'un édifice logique construit à l'aide de concepts irréductibles, ou reconnus comme tels, soudés par des principes relevant pour certains de l'expérience, pour d'autres de la logique



courante. C'est ainsi, par exemple, que l'on ne cherchera pas à définir la droite, concept simple dont l'image la plus intuitive est celle d'un fil tendu, prolongé à l'infini dans les deux sens ; que l'on admettra, par conséquence directe de cette image expérimentale, le fait que par deux points ne peut passer plus d'une droite ; ou encore que l'on déduira, par application des principes de la logique, l'égalité de deux figures jouissant de la propriété d'être elles-mêmes égales à une même troisième.

On le voit : trois considérations apparaissent comme nécessaires à l'édification de la géométrie : la représentation graphique, l'intuition, le raisonnement logique.

Il va de soi que sous une telle conception, la mécanisation de la géométrie est pratiquement impossible. Heureusement, les géomètres du siècle passé, par l'analyse poussée de la structure de la géométrie en ont assaini les fondements.

Dans l'état actuel des sciences mathématiques, la géométrie est définie par un système de principes de base assujetti à la seule condition de comptabilité. Que ces principes soient relatifs à la géométrie classique, projective ou algébrique, ils sont à présent établis avec un tel degré de rigueur logique que les développements qui s'ensuivent (les théorèmes) peuvent s'établir par un mécanisme purement logique. Tout raisonnement intuitif devient non seulement inutile mais insolite. Dès lors, les conditions inhérentes à la mécanisation d'un système de raisonnement étant réalisées, la traduction des principes de la géométrie en circuits logiques doit être une possibilité.

*Exposer les principes de réalisation d'une machine logique capable d'élaborer des théorèmes de géométrie, tel est le but de l'étude présente.*

Il peut exister autant de géométries différentes qu'il existe de systèmes différents de principes de base (postulats et axiomes). Dire qu'il est possible théoriquement de réaliser un nombre illimité de ces systèmes et de là un nombre illimité de géométries serait diminuer l'importance des géométries effectivement développées.

Une géométrie élaborée à partir de quelques principes réunis au hasard ne se limiterait souvent qu'à ceux-ci ou, le cas contraire, ne serait qu'une simple curiosité mathématique sans valeur aucune au point de vue des sciences.

## 2) A la recherche d'une géométrie « mécanisable ».

A priori, il semble qu'un système d'axiomes logiquement conçu soit immédiatement « automatisable ». En fait il n'en est rien et de

sérieuses modifications ou interprétations doivent lui être apportées pour que sa traduction en circuits logiques soit possible. C'est ce que prouvent les quelques considérations qui suivent.

Trois géométries sont fondamentales dans l'étude macroscopique — par opposition à l'étude infinitésimale comprenant notamment les géométries différentielle et infinitésimale — des figures : la *géométrie classique*, dite d'Euclide, enseignée dans nos écoles secondaires, la *géométrie projective* qui, en principe, comme son nom l'indique, ne tient compte que des propriétés projectives des figures et la *géométrie algébrique* se rapportant principalement aux courbes et surfaces algébriques et mettant sur le même pied les éléments réels et imaginaires.

a) Si la géométrie classique apparaît comme un modèle de raisonnement appliqué à des données concrètes, elle est loin de présenter, dans son édification, la rigueur logique souhaitée dans les sciences mathématiques. La preuve en est que, contrairement à une opinion courante, il est impossible, et non seulement pour des raisons pratiques, de « faire » de la géométrie classique sans avoir recours aux figures. Celles-ci contiennent, en effet, des principes qui n'ont pu être dégagés lors du recensement des axiomes de base et qui pourtant, inconsciemment peut-être, sont utilisés dans la démonstration des théorèmes.

On connaît la célèbre proposition réputée indémontrable et selon laquelle il est impossible de mener, par un point, plus d'une parallèle à une droite donnée (postulatum d'Euclide).

Les démonstrations éventuelles ne font que repousser la proposition sous d'autres énoncés <sup>(1)</sup>. S'il est absolument vrai que cette proposition soit indémontrable, ce n'est certainement pas dû, comme certains traités ont tendance à l'affirmer, à une faiblesse de l'enchaînement logique des propositions, mais bien plutôt parce que la définition même de la droite, sur laquelle se base le raisonnement, est incomplète. Au contraire, une définition complète éliminerait automatiquement le postulat d'Euclide. Au point de vue de la mécanisation, la mise au complet de la définition des concepts intervenant dans la géométrie n'offre pas de difficultés de principe. Le seul inconvénient, qui ne serait d'ailleurs pas d'ordre logique, se traduirait par une surabondance des axiomes élémentaires. Ainsi, dans le cas de la droite, la définition serait complète si outre les deux axiomes universellement reconnus, à savoir

---

(1) L'Académie Royale des Sciences de Belgique semble ne reconnaître le postulatum d'Euclide que sous la forme suivante : si, sur une droite, on construit une perpendiculaire et une oblique, elles se rencontreront nécessairement.



- par deux points distincts il ne passe qu'une seule droite,
- une droite est illimitée dans les deux sens,

on admettait tout simplement le postulat d'Euclide énoncé plus haut.

La surabondance de principes se manifesterait ici par le fait que les deux derniers axiomes ne seraient pas complètement indépendants tout en étant différents. Il est inutile d'insister sur ce problème, celui-ci ayant été résolu, pour la mécanisation de la géométrie, par un tout autre moyen.

S'il est donc relativement facile de remédier à des définitions incomplètes, il n'en est plus du tout ainsi lorsque des principes ou notions plus abstraits sont mis en cause.

Parmi les définitions fondamentales de la géométrie classique, on relève la suivante : deux figures sont égales lorsqu'elles peuvent coïncider. Que l'on sache définir la coïncidence de deux figures géométriques, passe encore. Mais définir l'état de deux figures pouvant coïncider est absolument illusoire. Deux figures coïncident ou ne coïncident pas. Il n'y a pas à sortir de ce dilemme. Certains avanceront bien que l'état de deux figures *pouvant coïncider* est telle que l'une des figures peut être amenée en coïncidence avec l'autre par un simple déplacement. Mais alors qu'ils définissent ce que l'on entend par déplacement. Et qu'ils ne fassent surtout pas appel, pour cette nouvelle définition, à la notion de figures égales. D'autre part, l'élimination pure et simple de la notion de « déplacement » correspondrait à la destruction complète de la structure de la géométrie classique : ce serait, en effet, l'élimination de la notion de segments égaux, d'angles égaux et, de là, de l'angle droit, etc.

b) Beaucoup plus logique est la conception projective de la géométrie. La caractéristique essentielle de cette interprétation est la séparation fondamentale entre les notions de nature métrique et celles de nature projective. Ainsi, par exemple, le triangle sera une figure projective car, envisagé sous n'importe quelle perspective, ce sera toujours un triangle ; par contre le carré, par la perspective, pourra sous certains angles, prendre l'allure d'un parallélogramme.

La géométrie projective s'édifie entièrement sur un système d'axiomes rigoureux <sup>(1)</sup> ; aucune lacune d'ordre logique ne peut être relevée dans son élaboration. Et pourtant, telle qu'elle se présente ordinairement, elle ne peut subir la technique de la mécanisation.

Considérons, par exemple, l'axiome suivant dit « postulat de

---

(1) Lucien GODEAUX, *Leçons de géométrie projective*. Hermann et Cie, Paris.

l'ordre » : un point  $O$  étant fixé sur une droite, les points de cette droite peuvent être ordonnés de manière à ce que  $O$  précède chaque point ; dans cet ordre, premièrement, chaque point de la droite en précède toujours un autre et, deuxièmement, entre deux points  $A$  et  $B$  de la droite tels que  $A$  précède  $B$ , il existe toujours quelque point suivant  $A$  et précédant  $B$ . Postulat qui n'est d'ailleurs qu'une manière rigoureuse et logique d'affirmer, premièrement, que les points d'une droite s'étendent à l'infini et, deuxièmement, qu'il y a une infinité de points entre deux points quelconques  $A$  et  $B$  de la droite.

L'obstacle à la mécanisation apparaît immédiatement : la géométrie projective envisage *simultanément* une infinité d'éléments. Si l'infini n'intervenait que sous la forme de *direction*, il pourrait être mécanisé, car dans ce cas, il serait assimilé à une convention de langage. Il n'en est pas de même lorsque l'infini a le sens de *quantité*.

Si le postulat de l'ordre ne peut être mécanisé, a fortiori en sera-t-il ainsi pour le postulat de Dedekind traduisant, sous forme rigoureuse, la notion de continuité des points sur une droite.

Éliminer ces deux postulats serait réduire la géométrie à des proportions peu intéressantes.

Il existe d'ailleurs d'autres causes de difficultés à la mécanisation, notamment le fait que la géométrie projective suppose l'existence préalable de toutes les figures dans le plan ou dans l'espace ou encore le fait que les postulats relatifs à la géométrie plane ou spatiale sont inséparables.

c) La géométrie algébrique qui, en quelque sorte, est une extension de la géométrie projective, ne possède pas de postulat explicite bien défini : ce sont surtout ses méthodes propres qui la caractérise.

### 3) *La géométrie des intersections.*

Des exemples qui précèdent, il ressort qu'une transformation radicale des bases de la géométrie est absolument nécessaire si l'on désire leur faire subir les procédés de la mécanisation.

La recherche de cette transformation nous a conduit à poser un système d'axiomes permettant de retrouver tous les théorèmes des géométries classique, projective et algébrique et susceptibles d'être mécanisés.

Trois de ces axiomes sont à la base d'une géométrie que nous avons dénommée *géométrie des intersections* et qui rassemble *toutes* les propositions des géométries classique, projective et algébrique pouvant s'énoncer à l'aide d'intersections de concepts géométriques : telles sont, par exemple, les propositions relatives aux droites (con-



courantes, parallèles, orthogonales,...), à l'égalité des segments ou des angles, à la configuration d'un ensemble de points (circonférence, conique, cubique, et d'une façon générale toutes les courbes algébriques), aux éléments associés à ces courbes (tangentes, points d'inflexion, centre...). Les propositions se rapportant à la somme des segments ou à la longueur des courbes ne peuvent, par exemple, en faire partie. La géométrie des intersections est rigoureusement définie par ses principes de base : ses postulats propres et les axiomes de la logique pure.

Dans le présent exposé, seule la géométrie à deux dimensions sera prise en considération. L'extension du principe de la mécanisation aux géométries d'un nombre supérieur de dimensions n'offre pas de difficultés majeures ; seule la réalisation technique est un peu « lourde ». Géométrie à deux dimensions ne signifie pas nécessairement géométrie plane, et c'est ainsi que certaines propositions de la géométrie spatiale pourront y être résolues par les principes d'une géométrie à deux dimensions. Il n'est peut-être pas inutile de rappeler, à ce sujet, que l'on passe de la géométrie à deux dimensions à la géométrie plane par un simple changement de notations et un ensemble de conventions.

Bien que la géométrie des intersections ne repose pas sur les mêmes bases que la géométrie dite algébrique, les propositions en sont pratiquement identiques. La différence essentielle réside dans le fait que la première, au contraire de la géométrie algébrique, ne fait appel à aucune représentation analytique. Elle définit les courbes algébriques par des propriétés purement géométriques.

Vue sous l'optique de la géométrie projective, la géométrie des intersections ne prend pas en considération les postulats de l'ordre, mais admet, par contre, ce que la géométrie projective considère comme une conséquence de ces postulats, le théorème fondamental de von Staudt relatif à l'unicité de la projectivité.

Enfin, du fait que les éléments imaginaires ne sont en rien différenciés des éléments réels, la géométrie des intersections est plus générale que la géométrie classique. Il lui est possible d'établir certaines propositions qui, d'ordinaire, ne relèvent que de la géométrie analytique.

#### 4) *Les principes de base de la géométrie des intersections.*

L'analyse d'une théorie géométrique met en évidence les principes de base suivants :

- les concepts de base posés a priori et sur lesquels s'édifie la théorie ;

- les postulats indiquant la manière dont s'agencent ces concepts ;
- les constructions ou éléments qu'il est nécessaire d'introduire dans l'établissement d'une proposition sans pour cela que celle-ci diminue dans sa généralité ;
- certaines méthodes de raisonnement relevant de la simple logique.

Cet ensemble de principes forme un système qui *définit* une théorie géométrique.

En ce qui concerne la géométrie des intersections, le système de principes sera le suivant.

A) *Les concepts de base.*

1<sup>o</sup>) Des éléments simples de deux espèces différentes : les « points généralisés » et les « droites généralisées ».

Par « points généralisés », il est entendu, ici, outre l'ensemble des points tels que les considère la géométrie classique ordinaire, mais également l'ensemble des points dits *imaginaires* et *impropres* utilisés en géométrie analytique. Ainsi, pour la configuration formée par une droite ne rencontrant pas une circonférence en géométrie classique, la géométrie analytique admettra deux points d'intersection, mais les dénommera, simple convention de langage, « imaginaires ».

De même, en ce qui concerne la configuration formée, en géométrie classique, par deux droites parallèles, la géométrie analytique leur attribuera un point d'intersection qui sera dit *impropre* ou *à l'infini*.

La géométrie des intersections, quant à elle, ne distinguera aucune différence entre points réels, imaginaires ou impropres, d'où la dénomination de « points généralisés ».

Il en sera de même des droites dites « généralisées » qui comprendront, outre les droites (réelles) de la géométrie classique, les droites dites « imaginaires » de la géométrie analytique (en particulier, les droites « isotropes » rencontrées dans la théorie des foyers des coniques) et la droite *impropre* ou *à l'infini* formée par l'ensemble des points impropres.

2<sup>o</sup>) Une notion de *liaison* entre un point généralisé et une droite généralisée.

En fait, cette notion signifie simplement l'état d'un point situé sur une droite ou, ce qui revient au même, l'état d'une droite passant par un point.

### B) *Les postulats.*

1<sup>o</sup>) Par deux points distincts ne peut passer plus d'une droite.

2<sup>o</sup>) Deux droites distinctes ne peuvent avoir plus d'un point commun.

3<sup>o</sup>) Le troisième et dernier postulat est à la base même de la géométrie des intersections. C'est celui qui la caractérise et lui donne son originalité. Il s'énonce : si l'hexagone 1, 2, 3, 4, 5, 6 est tel que les sommets 1, 3, 5 et 2, 4, 6 appartiennent respectivement à deux droites, les points d'intersection des côtés opposés sont collinéaires.

Ce postulat n'est au fond qu'une application particulière du théorème de Pascal relatif à l'hexagone inscrit dans une conique, à savoir : les côtés opposés d'un tel hexagone se rencontrent en trois points alignés sur une droite. La conique (courbe algébrique du second degré) est, dans cette application particulière, dégénérée en deux droites concourantes.

### C) *Les constructions.*

Le principe des constructions admet, a priori, qu'il est possible et permis, dans la démonstration d'une proposition, d'introduire, et cela sans changer la généralité du théorème,

- une droite passant par deux points distincts,
- un point situé sur deux droites également distinctes.

Le fait que par deux points ne peut passer plus d'une droite (postulat I) n'exige pas l'existence effective d'une droite reliant ces points. Cette remarque est fondamentale si l'on désire éviter aux machines géométriques, la nécessité de posséder des capacités trop grandes. Nous verrons, en effet, qu'une telle machine possède des droites en nombre limité ; elle ne peut donc pas les « gaspiller » mais bien plutôt les utiliser judicieusement pour poser, d'une part, les énoncés des propositions à établir et, d'autre part, les constructions nécessaires aux démonstrations. Nous aurons l'occasion d'y revenir.

### D) *Un méthode de raisonnement.*

Si, pour la démonstration des propositions d'une géométrie quelconque, toutes les méthodes logiques de raisonnement sont valables, il convient de se rappeler que la géométrie des intersections doit avoir, dans son essence, la faculté de se mécaniser et que, par conséquent, il est nécessaire d'être circonspect dans le choix des méthodes de raisonnement, celles-ci devant être également mécanisées. Or, l'analyse méthodologique d'une théorie géométrique révèle qu'il est

possible d'éliminer certaines méthodes de raisonnement à condition toutefois, de compléter éventuellement les postulats de base.

En ce qui concerne la géométrie des intersections, la *méthode déductive*, d'ailleurs la plus efficace et la plus apte à subir la mécanisation, est suffisante.

Le lecteur aura d'ailleurs remarqué que si le raisonnement dit *par l'absurde*, par exemple, avait été toléré, un des postulat I ou II aurait été surabondant. En effet, si contrairement à ce qu'indique le postulat II, deux droites distinctes pouvaient avoir deux points distincts en commun, le postulat I serait mis en défaut car par ces deux points passerait plus d'une droite.

##### 5) *Élaboration de la géométrie des intersections.*

Étant donné que les concepts de base ne sont formés que de points et de droites d'une part, et d'une notion de liaison les unissant de l'autre, seules les configurations comprenant ces concepts pourront être définies. Il en est par exemple ainsi pour la configuration représentant le théorème de Desargues relatif aux triangles homologues et qui s'énonce : si deux triangles ont leurs sommets alignés sur trois droites concourantes, les côtés homologues se rencontreront suivant trois points collinéaires. Cette proposition est concrétisée graphiquement par la figure ci-dessous (fig. 1) : un simple examen montre, en

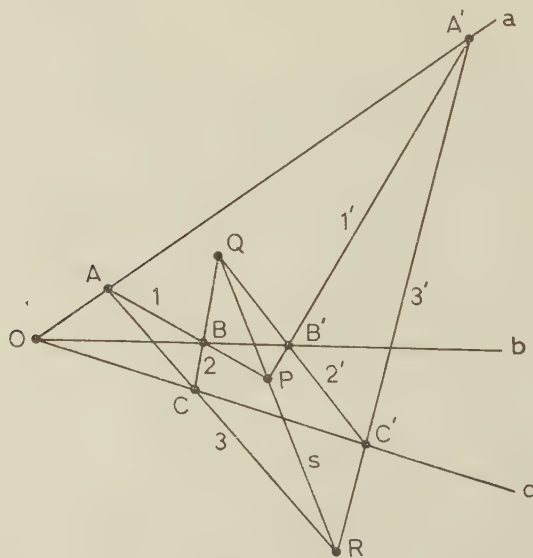


FIG. 1.



effet que celle-ci peut être construite par le simple emploi d'une règle non graduée.

Il n'est pas dans nos intentions d'élaborer toute une géométrie basée sur les principes énoncés au paragraphe précédent, géométrie qui serait précisément celle des intersections. Qu'il nous suffise de signaler que toute configuration pouvant être posée à l'aide des concepts définis précédemment, *est démontrable* à partir de ces seuls principes. Ceux-ci forment donc un système *complet*. En d'autres termes, il n'est plus possible d'établir une relation entre les concepts de points et de droites et la notion de liaison — point situé sur une droite ou droite passant par un point, rappelons-le, — relation conforme aux propositions des géométrie classique, projective et algébrique, sans qu'elle ne soit une conséquence des trois postulats énoncés.

Il convient de remarquer, dans le système de principes de base de la géométrie des intersections, l'absence de tout ordre des points d'une droite ou des droites autour d'un point. La notion de point situé entre deux autres, par exemple, n'a aucun sens parce que non défini. Il s'ensuit que les configurations géométriques, réalisables à l'aide des concepts généralisés définis, pourraient ne pas être toutes en mesure de s'élaborer par le seul emploi des points et droites réels rencontrés en géométrie classique. Celle-ci considère, en effet, pour sa part, un *ordre intrinsèque* dans l'ensemble de ses éléments. Ceci n'a rien d'absurde si l'on se rappelle que les éléments points et droites généralisés comprennent entre autres les éléments imaginaires et que ceux-ci ne peuvent être ordonnés au sens classique du terme.

Pour donner un exemple, qu'il suffise de rappeler que la configuration formée par les droites inflexionnelles (droites joignant les points d'inflexions) d'une cubique plane (courbe algébrique du troisième degré) ne peut être formée par l'emploi de droites toutes réelles. Plus explicitement, en dénommant  $A_1, A_2, \dots, A_9$  les 9 points d'inflexion d'une cubique plane, les 12 droites inflexionnelles seront respectivement

$$\begin{array}{lll}
 A_1A_2A_3 & A_4A_5A_6 & A_7A_8A_9 \\
 A_1A_4A_8 & A_2A_6A_9 & A_3A_5A_7 \\
 A_1A_5A_9 & A_2A_4A_7 & A_3A_6A_8 \\
 A_1A_7A_6 & A_2A_5A_8 & A_4A_9A_3
 \end{array}$$

Quelle que soit la disposition graphique donnée à ces points, il ne sera jamais possible de représenter simultanément toutes les droites inflexionnelles d'une manière effective. Il n'en sera plus de même si

l'on abandonne la conception courante et intuitive de la droite en remplaçant celle-ci par une ligne continue joignant des points normalement collinéaires (fig. 2).

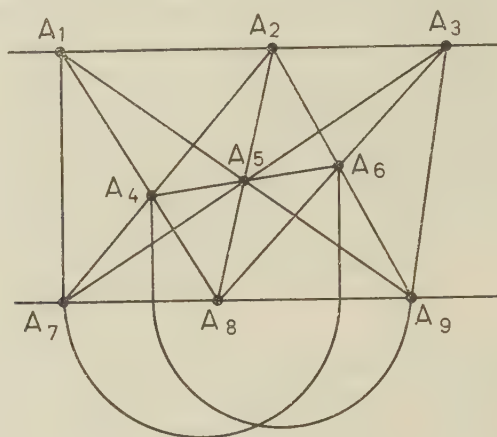


FIG. 2.

#### 6) Représentation matricielle des configurations géométriques.

Beaucoup plus suggestive et logique est la représentation, sous la forme de tableaux matriciels, des configurations relatives aux propositions géométriques. Cette technique est basée sur les deux conventions que voici :

— une perforation à l'intersection d'une colonne et d'une ligne horizontale  $d$  d'une carte divisée en colonnes suivant les éléments « points » et en lignes suivant les éléments « droites » signifie que le point  $A$  est situé sur la droite  $d$  ;

— deux colonnes (lignes) distinctes représentent nécessairement deux points (droites) distincts.

Les points des propositions de la géométrie des intersections sont ainsi concrétisés par des colonnes, les droites par des lignes et la notion de liaison entre un point et une droite par une perforation à l'intersection de ces colonne et ligne correspondantes. Il s'ensuit que pour caractériser la propriété de trois points d'être collinéaires, il suffira de réaliser trois perforations aux intersections respectives d'une même ligne horizontale et des colonnes correspondant aux points. Ainsi, dans l'exemple de la fig. 3, les perforations situées sur la ligne  $r$  signifie simplement que les points  $A$ ,  $C$  et  $M$  sont collinéaires tandis que les perforations situées sur la ligne  $s$  signifie que ce sont les points  $B$ ,  $D$  et  $M$  qui sont en ligne droite. Quant aux deux

perforations de la colonne M, elles concrétisent le fait que le point M est à l'intersection des droites  $r$  et  $s$ . En résumé, la matrice de la fig. 3 établit le point d'intersection M des diagonales AC et BD du quadrilatère de sommet A, B, C et D.

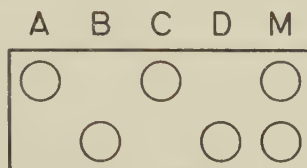


FIG. 3.

Corrélativement, trois droites seront concourantes si leurs lignes horizontales correspondantes de la représentation matricielle possèdent trois perforations situées dans une même colonne.

Le lecteur pourra aisément vérifier que les propositions géométriques caractérisées graphiquement par les fig. 1 et 2 se représenteront matriciellement par les tableaux respectifs des fig. 4 et 5. On notera notamment, dans cette dernière, les 9 colonnes correspondant aux 9 points d'inflexion de la cubique plane et les 12 lignes horizontales correspondant aux 12 droites inflexionnelles.

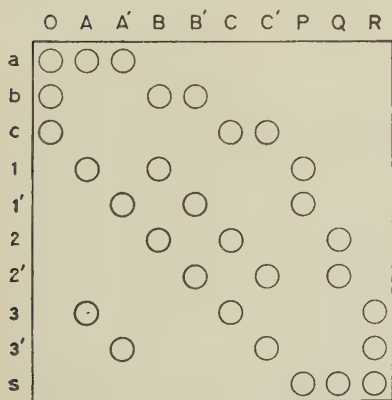


FIG. 4.

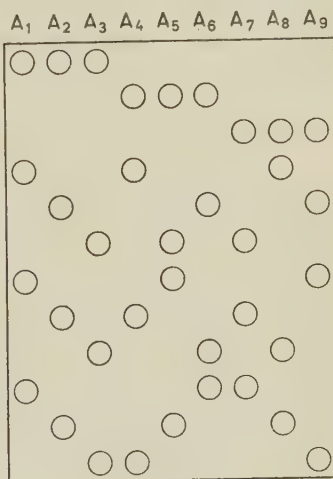


FIG. 5.

## CHAPITRE II

## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE GÉOMÉTRIQUE

Le premier chapitre a mis en évidence une géométrie dont la structure est uniquement composée de points, de droites et d'une notion permettant aux points d'appartenir aux droites. Le chapitre III montrera comment de nombreuses notions des géométries classique, projective et algébrique peuvent être définies sur la base de ces seuls éléments. Mais, avant de passer à cette extension de la géométrie des intersections, il convient de montrer comment un mécanisme permettant d'établir des propositions construites à l'aide des concepts du chapitre précédent peut être réalisé.

Une mise au point préalable est toutefois nécessaire. Le but du présent exposé étant, non pas de préciser les circuits relatifs à la réalisation effective d'un prototype de machine géométrique, mais bien plutôt de vouloir faire comprendre le fonctionnement général d'une telle machine, il nous a paru plus explicite, à cette fin, d'utiliser la notion de carte perforée. Mais cet expédient n'a, insistons-y, qu'un but purement didactique, une perforation concrétisant, en fait, un ensemble de connexions. Il s'ensuit que ce sera la terminologie se rapportant aux cartes perforées qui sera utilisée dans les développements qui suivent (superposition de cartes pour la comparaison des perforations, par exemple).

*7) Rôle d'une machine géométrique.*

Ce rôle est en principe très simple : en présence d'une configuration (formée uniquement de droites passant par des points et de points situés à l'intersection de droites) de la géométrie des intersections, configuration traduisant, par exemple, les hypothèses de départ d'une proposition à établir, une machine géométrique doit être en mesure, dans sa conception la plus simple, de signaler les liaisons <sup>(1)</sup> entre points et droites qui s'imposent, liaisons conformes d'une part aux hypothèses posées et d'autre part aux postulats même de la géométrie. Plus explicitement, supposons que dans une configuration de droites et de points, trois de ceux-ci A, B et C doivent, d'après la disposition même des éléments de cette configuration et conformé-

---

<sup>(1)</sup> Nous disons « dans sa conception la plus simple » car il va de soi que des machines perfectionnées devront, non seulement signaler les liaisons à établir, mais également les réaliser.



ment aux postulats, nécessairement être alignés sur une même droite ; admettons de plus qu'une droite  $d$  passe effectivement par les points A et B. Dès lors, mise en présence d'une telle configuration, une machine géométrique, après examen, doit signaler le fait que le point C est à établir sur la droite  $d$ .

Avant de poursuivre, une remarque importante s'impose : le lecteur aura en effet noter que ce que l'on demande à une machine géométrique n'est pas d'indiquer si « oui » ou « non », tel théorème est vrai, mais plutôt de signaler *tout* ce qu'elle peut conclure de l'examen d'un ensemble d'hypothèses. De ce fait, une machine géométrique, telle que nous la concevons dans cet exposé, ne se limite pas à démontrer des théorèmes, mais se veut d'en élaborer et d'en inventer.

Si nous adoptons, à présent, la représentation matricielle des configurations, nous constatons immédiatement que le rôle d'une machine géométrique consiste en ceci : en présence d'un système de perforations dans une carte, la machine doit indiquer, conformément aux postulats qui lui ont été fournis lors de sa construction, le ou les emplacements sur lesquels d'autres perforations s'imposent.

#### 8) *La mécanisation des postulats.*

Pour établir des théorèmes, la machine géométrique doit donc se baser sur les trois postulats de la géométrie des intersections, postulats énoncés au paragraphe 4, rubrique B, et que nous reprenons ici sous une forme plus « matérielle ».

Les deux premiers peuvent être soudés et s'interpréter comme suit : la configuration formée par deux droites distinctes ayant en commun deux points distincts ne peut subsister ou, si l'on veut, doit subir une transformation telle que sa disparition s'ensuive.

Si, au point de vue géométrique, cette configuration (dite configuration de dilemme) ne peut effectivement exister, rien ne l'empêche de se réaliser matriciellement (c'est d'ailleurs ce qui peut parfois se produire lorsque la machine effectue elle-même des constructions, comme nous aurons l'occasion de le constater dans la suite). Ainsi la configuration des perforations de la matrice ci-contre (fig. 6) caractérise le fait que les points *distincts* A et D sont simultanément sur les droites *distinctes*  $p$  et  $r$ . On remarquera que la configuration de dilemme est réalisée dans une matrice lorsque quatre perforations sont situées aux sommets d'un rectangle dont les côtés sont formés par des lignes horizontales et des colonnes.

Il n'est donc pas difficile d'imaginer pour la machine un mécanisme permettant de déceler de telles configurations. D'ailleurs,

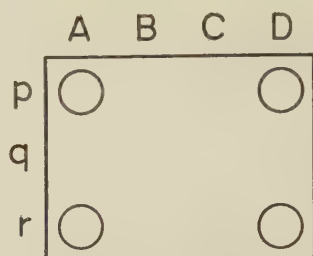


FIG. 6.

celles-ci ne peuvent se produire si les hypothèses de départ ont été convenablement posées et si, de plus, la machine n'effectue pas elle-même les constructions. C'est ce que nous admettrons jusqu'à nouvel ordre.

Le troisième postulat peut s'énoncer de la manière suivante : si les 9 points  $A_1, A_2, \dots, A_9$  sont tels que 8 des 9 trios que voici

$$\begin{array}{lll} A_1A_2A_3 & A_4A_5A_6 & A_7A_8A_9 \\ A_1A_8A_6 & A_4A_2A_9 & A_7A_5A_3 \\ A_1A_5A_9 & A_4A_8A_3 & A_7A_2A_6 \end{array}$$

sont formés de points collinéaires, il en est de même du 9<sup>me</sup>.

La fig. 7 concrétise la configuration de ces 9 points. La représentation matricielle est donnée par la fig. 8. Sous cette dernière forme, le postulat s'interprétera comme suit : si dans la matrice de la fig. 8, 26 des 27 perforations qu'elle contient sont effectivement réalisées, il doit en être de même de la 27<sup>me</sup>.

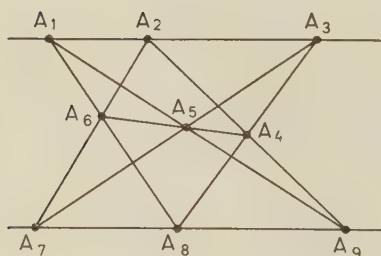


FIG. 7.

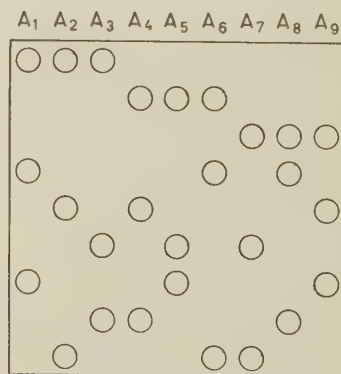


FIG. 8.

Ce postulat, la machine doit le posséder. En d'autres termes, elle doit être en possession d'une carte perforée conformément au schéma de la fig. 8, carte qui sera à la base même de son fonctionnement. La machine pour orienter son raisonnement s'y référera continuellement. Comment le fera-t-elle ? C'est ce que nous allons voir maintenant.

9) *Le « raisonnement » de la machine géométrique.*

Celle-ci possède donc une carte formée de 9 colonnes et 9 lignes horizontales à l'intersection desquelles 27 perforations ont été opérées. La disposition de ces dernières traduit, sous une forme « matérielle », la configuration du postulat III de la géométrie des intersections. Pour fixer les idées, nous dénommerons cette carte la *matrice de base* ou *matrice* du postulat III.

Voyons maintenant, d'une manière méthodique, le principe de la technique utilisée par une machine géométrique hypothétique, pour établir un théorème en déduction d'un ensemble d'hypothèses données a priori. Avant la mise en marche de la machine, il convient, bien entendu, que cette dernière reçoive ces hypothèses sous une forme appropriée et le meilleur moyen de le faire est de concrétiser celles-ci par une configuration de perforations dans une carte que nous appellerons, la *matrice des hypothèses* de départ.

Cette opération terminée, la machine

1) confectionnera de toute pièce une série de nouvelles matrices dites *matrices de confection*, et cela, en choisissant de toutes les manières possibles 9 colonnes (distinctes) et 9 lignes (également distinctes) parmi les colonnes et lignes de la matrice des hypothèses <sup>(1)</sup> ;

2) comparera, par superposition, chacune des matrices ainsi confectionnées avec celle du postulat III.

Si, par cette opération, 26 perforations venaient à se trouver en coïncidence entre la matrice de base et une des matrices de confection, la machine pourrait en conclure, avec certitude, qu'une perforation est à signaler sur la matrice de confection à l'emplacement même de la 27<sup>me</sup> perforation de la matrice de base.

Cette matrice de confection, reportée dans la matrice des hypothèses d'où elle est issue, permettra automatiquement de déter-

---

<sup>(1)</sup> Opération toujours possible car la géométrie n'offre pas d'exemple d'un théorème pouvant se traduire par une matrice d'un nombre de lignes ou de colonnes inférieur à 9.

miner, dans celles-ci, l'emplacement de la perforation à effectuer, perforation correspondant géométriquement à la liaison à établir conformément aux hypothèses de départ et aux postulats de la géométrie.

Le théorème serait ainsi démontré.

Tel est le principe, étonnamment simple, du fonctionnement d'une machine géométrique.

Il convient toutefois de signaler que, suivie à la lettre, la méthode ci-dessus exposée, serait un peu lente, aussi, la réalisation effective d'un prototype tiendra-t-elle compte, pour sa simplification, d'une part de la grande symétrie régnant dans la disposition des perforations de la matrice de base, et d'autre part, d'un ordre rationnel dans le choix des matrices de confection. Nous ne pouvons, dans cet exposé général, nous étendre davantage sur ces considérations d'ordre plutôt technique et qui n'ont d'ailleurs aucune incidence sur le principe même du fonctionnement des machines géométriques telles que nous les concevons ici.

#### 10) *Deux exemples concrets.*

Le premier sera relatif à la géométrie projective, le second à la géométrie algébrique.

##### *Premier exemple.*

On connaît la proposition que voici.

En joignant deux points situés sur deux côtés opposés d'un quadrilatère, on forme deux nouveaux quadrilatères. On peut montrer que les points de concours des diagonales des trois quadrilatères ainsi obtenus sont collinéaires.

Soient M et N deux points pris sur les côtés opposés AB et CD du quadrilatère ABCD. En appelant respectivement P, Q et R les points de concours des diagonales des quadrilatères ABCD, AMND et BMNC, le théorème sera établi si l'on peut prouver que le point P appartient à la droite QR.

Matriciellement, les hypothèses du théorème se présenteront suivant le tableau ci-contre (fig. 9) et le théorème lui-même sera établi s'il peut être prouvé qu'une perforation *est à effectuer* à l'emplacement de la croix : en effet dans ce cas, une droite unira les points P, Q et R (rappelons que pour caractériser le fait que trois points sont en ligne droite, il suffit de réaliser trois perforations aux intersections respectives des colonnes correspondant à ces points avec une même ligne horizontale).



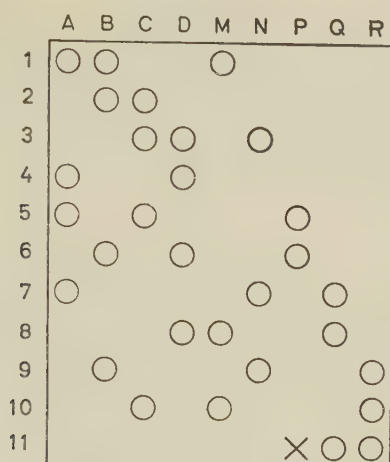


FIG. 9.

En présence du tableau ainsi forgé et en agissant comme il a été exposé au paragraphe précédent, la machine arrivera fatalement à confectionner la matrice de la fig. 10.

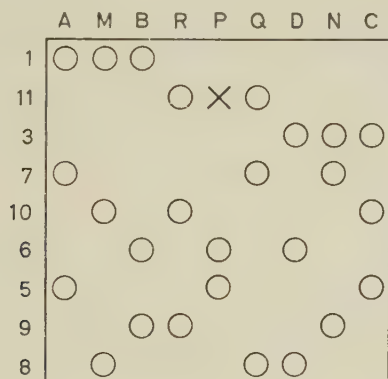


FIG. 10.

Le lecteur, en comparant cette dernière matrice avec celle du postulat III (fig. 8), constatera immédiatement qu'elles ont toutes deux en commun 26 perforations qui pourraient coïncider si les deux matrices étaient superposées et que, de plus, la 27<sup>me</sup> perforation du postulat de base est précisément à l'emplacement de la croix dans la

matrice de confection. C'est ce qu'indiquera la machine en établissant de ce fait le théorème.

Il convient de noter que la matrice de confection peut avoir plus de 26 perforations, mais cela n'a aucune importance; ce qui compte, ce sont les perforations en coïncidence avec celles de la matrice du postulat III.

### *Second exemple.*

Le second exemple sera une propriété des quadrilatères réciproques rencontrée dans certaines configurations de la géométrie algébrique. Deux quadrilatères sont dits réciproques lorsque les sommets de l'un sont situés sur les côtés de l'autre et réciproquement. Il n'est pas possible de construire de tels quadrilatères à l'aide d'une simple règle, les côtés ne pouvant tous être réels simultanément.

Soient, pour fixer les idées,  $ABCD$  et  $A'B'C'D'$ , ces deux quadrilatères. Les sommets  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  et  $D'$  du second quadrilatère seront respectivement situés sur les côtés  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  et  $DA$  du premier et, réciproquement, les sommets  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  du premier, sur les côtés  $B'C'$ ,  $C'D'$ ,  $D'A'$  et  $A'B'$  du second. Le théorème consiste à démontrer que si  $P$  et  $Q$  sont respectivement les points d'intersection des couples de côtés opposés  $AB$ ,  $CD$  et  $BC$ ,  $DA$  du premier quadrilatère, les points d'intersection respectifs  $P'$  et  $Q'$  des couples de côtés opposés  $A'B'$ ,  $C'D'$  et  $B'C'$ ,  $D'A'$  du second seront situés tous deux sur la droite  $PQ$ .

La configuration des éléments de la proposition énoncée sera représentée par la matrice de la fig. 11, les emplacements caractérisant l'appartenance des points  $P'$  et  $Q'$  à la droite  $PQ$  (droite 9) étant désignés par deux croix.

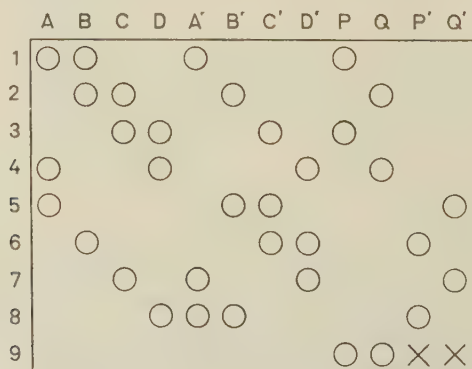


FIG. 11.

En agissant d'une manière analogue à celle qui fut utilisée pour l'exemple précédent, la machine n'aura aucune difficulté à mettre en évidence les deux matrices que voici (fig. 12 et 13).

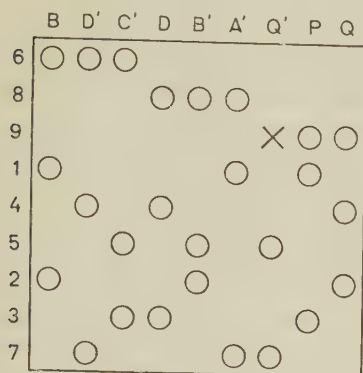


FIG. 12.

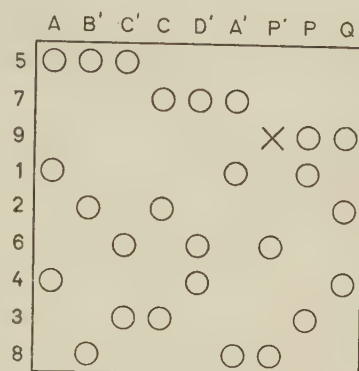


FIG. 13.

Ces dernières comparées à la matrice de base montrent immédiatement qu'une perforation de celle-ci n'a pas son correspondant parmi les perforations de chacune des deux matrices de confection prises séparément. L'emplacement de cette perforation déterminera ainsi dans chacune des deux matrices de confection, l'emplacement des perforations à établir. Le lecteur pourra constater que ces dernières sont précisément celles qui ont été désignées par une croix. La proposition géométrique est ainsi établie.

## CHAPITRE III

### MISE EN CODE DE QUELQUES CONCEPTS RELATIFS AUX GÉOMÉTRIES CLASSIQUE, PROJECTIVE ET ALGÈBRE

#### II) *Sens des définitions dans la géométrie des intersections.*

Telle qu'elle est présentée au chapitre précédent, notre machine hypothétique semble ne pouvoir résoudre que des propositions s'énonçant à l'aide des seuls concepts « point » et « droite » et de l'unique relation qui les unit, une relation permettant à un point d'appartenir à une droite. En fait, le champ d'application de la géométrie des intersections est relativement plus étendu puisque, comme nous allons le voir, des concepts ne faisant intervenir, dans

leur essence même, qu'une certaine idée d'intersection peuvent en faire partie.

Quels sont ces concepts ? En principe, tous ceux qui, s'ils étaient étudiés analytiquement (par les méthodes de la géométrie analytique, en particulier) pourraient s'exprimer par des relations algébriques. Il n'est pas facile de préciser d'emblée les limites exactes de la géométrie des intersections, d'autant plus que la plupart des concepts traités ordinairement dans les géométries classique, projective et algébrique n'ont qu'une partie d'eux-mêmes relative à la généralité dont il est question.

Considérons la circonférence à titre d'exemple. Il n'y a aucune idée d'intersection dans le fait que la circonférence est une ligne continue, pas plus que dans le fait qu'elle divise le plan en deux régions, intérieure et extérieure. Par contre, un ensemble de points jouissant de la propriété d'appartenir à une *même* circonférence (d'être concyclique) donne une idée d'intersection puisque ces points peuvent être assimilés aux sommets d'un polygone inscriptible, concept de la géométrie des intersections. Il en résulte que la circonférence de cette dernière géométrie est formée, par définition, d'un *fini* de points concycliques.

Il en est de même pour l'angle droit de la géométrie classique. Cet angle, exigeant, dans sa définition, une certaine idée de mesure, ne peut faire partie de la géométrie des intersections en tant qu'angle mesurable. Mais sa notion est étroitement liée à celle de deux droites orthogonales. Il s'ensuit que si, dans une proposition, l'angle droit n'entre en ligne de compte que parce qu'il caractérise l'intersection de deux droites perpendiculaires, il pourra être *défini* dans la géométrie des intersections.

Mathématiquement parlant, un concept fera partie de la géométrie des intersections s'il peut être rigoureusement défini par le seul emploi des concepts de base de cette géométrie. Nous passerons en revue la définition de quelques uns d'entre eux. A première vue, ces définitions semblent assez éloignées du sens que leur donne traditionnellement la géométrie classique. Et c'est normal ! Une définition ne pouvant s'établir que par l'emploi de concepts, eux-mêmes préalablement définis, il suffit que les principes de départ, les principes de base « indéfinissables » soient différents de la géométrie classique pour que tout le système des définitions soit bouleversé. Ce qui importe n'est donc pas le moyen de définir un concept, mais d'attribuer à une certaine configuration, des propriétés pouvant s'identifier à celles du concept que l'on veut précisément définir. Un choix judicieux de ces propriétés entraînera automatiquement, par déduc-



tion, toutes les autres. Une telle déduction sera précisément le travail d'une machine géométrique.

12) Nous nous sommes limités dans cet exposé aux définitions menant à celle de l'égalité de deux figures. On sait, en effet, que cette notion est à la base de la géométrie classique, notion intimement liée à celle de « déplacement ».

a) *Parallélisme*. Deux droites sont parallèles lorsque, situées dans un même plan, « elles ne se rencontrent pas si loin qu'on les prolonge ». Cette définition, plutôt négative, relève de la géométrie classique. La géométrie analytique va plus loin : deux droites sont parallèles lorsqu'elles se rencontrent en un point situé à l'infini ». Cette fois il y effectivement une intersection entre les deux droites parallèles, à l'infini peut-être, mais une intersection quand même. Or qu'est-ce l'infini dans cette définition sinon une simple convention de langage. Dès lors, aucune difficulté ne peut surgir pour la transposition de la définition de droites parallèles à la géométrie des intersections. Un point n'est « à l'infini » que si on l'y a mis ; en d'autres termes, si l'étiquette « d'être à l'infini » lui a été donnée a priori. La signification de l'expression « à l'infini » n'est donc pas nécessaire pour la construction d'une géométrie l'utilisant. Et c'est ainsi, que pour la géométrie des intersections, deux droites seront dites parallèles si un point baptisé « à l'infini » leur a été donné en commun. Une restriction toutefois : si plusieurs points jouissent de la propriété d'être « à l'infini », ils doivent nécessairement appartenir à une même droite, qui sera ainsi dénommée la droite *à l'infini* à la droite *impropre*.

La mise en code du parallélisme des droites se fera donc par l'intermédiaire de la droite impropre.

Si dans la représentation matricielle de la figure ci-contre (fig. 14), la droite 5 représente la droite impropre, les points A, B, C et D

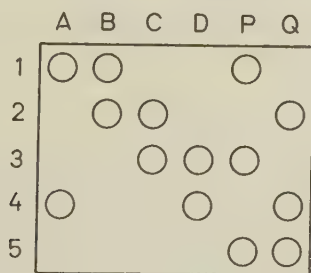


FIG. 14.

seront les sommets d'un parallélograme. P et Q seront précisément les points d'intersection impropres des côtés opposés 1, 3 et 2, 4.

b) *Coniques ou courbes algébriques du second degré.* En fait, comme il a été écrit au début de ce chapitre, la géométrie des intersections n'envisage pas les courbes au sens propre du terme mais permet de caractériser des points jouissant de la propriété d'appartenir à une *même* courbe du second degré. Et ce nombre de points doit être nécessairement fini. Ceci dit, un théorème fondamental dû à Pascal sera à la base même de la définition de cette courbe : six points appartiennent à une même conique, lorsque les côtés opposés de l'hexagone ayant ces six points pour sommets se rencontrent respectivement suivant trois points collinéaires. Ainsi, les six points A, B, C, D, E et F de la représentation matricielle ci-contre (fig. 15) appartiennent à une même courbe algébrique du

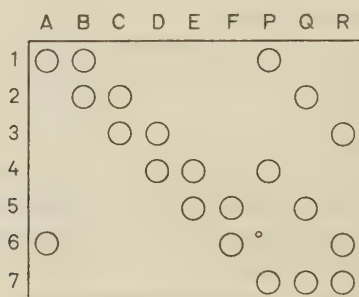


FIG. 15.

second degré. Cette définition peut s'étendre aisément à un nombre quelconque de points : il suffit de considérer quelques groupes de points judicieusement choisis parmi l'ensemble des points donnés. Un examen, même superficiel, montre que seules les notions de la géométrie des intersections sont utilisées pour cette définition.

c) *Circonférence.* La géométrie analytique enseigne qu'une circonférence est une conique particulière en ce sens qu'elle passe par les deux points cycliques. Que sont ces derniers ? Simplement les points d'intersection des deux droites isotropes avec la droite improprie. Or, jusqu'à présent, rien, dans la géométrie des intersections, n'a été défini au sujet des droites isotropes. Il s'ensuit, que nous sommes entièrement libres de choisir pour points cycliques, deux points absolument quelconques, pourvu toutefois qu'ils soient

situés sur la droite impropre. Ces points fixés, a priori, une fois pour toutes, permettront de définir des ensembles de points concycliques.

Si, par exemple, dans fig. 15, les points E et F sont considérés comme cycliques, les quatre autres, à savoir A, B, C, et D seront automatiquement situés sur une même circonférence. La droite 7 sera la droite impropre.

d) *Orthogonalité*. La notion d'orthogonalité entre deux droites est aussi simple à définir que celle de la conique, aucune convention supplémentaire n'étant nécessaire. La définition, peut-être un peu longue, ne se base que sur des propriétés universellement connues de la géométrie classique. Tout d'abord, il n'y a aucune difficulté, en géométrie plane, à mener, par un point, une perpendiculaire à une droite donnée si, d'une part, on est en possession de deux couples de droites orthogonales et si, d'autre part, on adopte les trois constructions que voici :

- mener une droite passant par deux points ;
- déterminer l'intersection de deux droites ;
- mener par un point une parallèle à une droite donnée.

(Les deux premières constructions relèvent directement des postulats de la géométrie des intersections ; la troisième peut se réaliser, la notion de parallélisme ayant été définie).

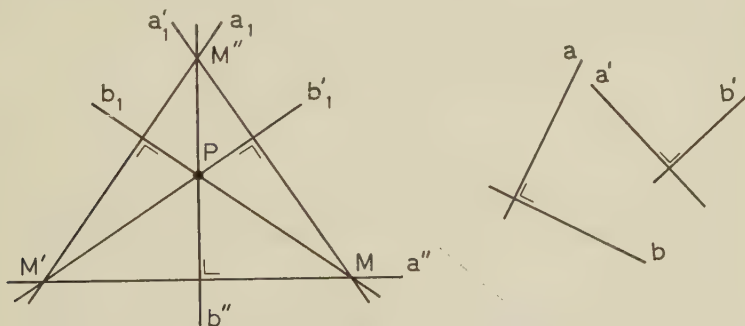


FIG. 16.

En effet, donnons-nous (fig. 16) deux couples de droites orthogonales  $(a, b)$  et  $(a', b')$  et proposons-nous de mener par un point  $R''$  une perpendiculaire à la droite  $a''$ . Par  $M''$ , menons les parallèles  $a_1$  et  $a'_1$  respectivement aux droites  $a$  et  $a'$ , parallèles rencontrant  $a''$  en des points  $M'$  et  $M$ . Dans le triangle  $MM'M''$  ainsi déterminé, les perpendiculaires issues des sommets  $M$  et  $M'$  aux côtés  $a_1$  et  $a'_1$  s'obtien-

dront simplement en menant par ces points des parallèles aux droites  $b$  et  $b'$  et soit  $P$  leur point d'intersection. Les trois hauteurs d'un triangle étant nécessairement concourantes, la perpendiculaire abaissée du point  $M''$  sur la droite  $a''$  devra nécessairement passer par le point  $P$ . Pour la géométrie des intersections la droite  $M''P$  sera par *définition* la perpendiculaire demandée.

Cette définition exige, rappelons-le, la possession, a priori, de deux couples de droites orthogonales.

Si la définition de l'orthogonalité de deux droites avait précédé celle de la circonférence, nous aurions pu choisir, pour angles droits, deux couples de droites absolument quelconques. Il aurait suffi de leur attribuer, a priori, l'« étiquette » d'angles droits comme cela a été fait pour les points à l'« infini ». Cette manière d'agir n'aurait en aucune façon été en contradiction avec la conception que l'on se fait habituellement des propriétés de l'angle droit, celles-ci n'appartenant pas intrinsèquement à l'angle droit lui-même mais ne se manifestant qu'en relation avec *d'autres* angles droits. Pour le constater, il suffit de se rappeler qu'il est toujours possible, en géométrie classique, de donner à deux angles droits des ouvertures quelconques en les projetant sur un autre plan que leur plan support.

Mais la circonférence a été définie et l'on sait à quel point certaines de ses propriétés sont intimement liées à celles de l'angle droit.

La propriété que l'on choisira pour unir d'une manière nécessaire et suffisante les propriétés des deux angles droits à celles de la circonférence sera par exemple la suivante (fig. 17) :

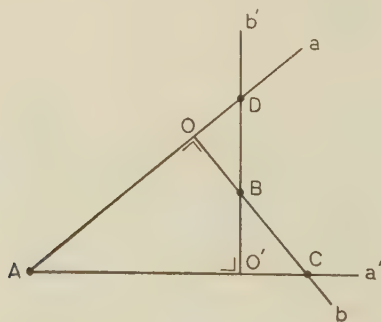


FIG. 17.

— si  $A$  et  $B$  sont respectivement les points d'intersection de couples de droites  $a, a'$  et  $b, b'$ , les points  $O, O', A$  et  $B$  seront concycliques ;

— si  $C$  et  $D$  sont respectivement les points d'intersection des couples de droites  $a', b$  et  $a, b'$ , les points  $O, O', C$  et  $D$  sont concycliques.



Cette condition nécessaire est également suffisante. En effet, si, avec les notations qui viennent d'être définies, les quadrilatères  $OA'O'B$  et  $OCO'D$  sont simultanément inscriptibles, les angles  $AOB$  et  $AO'B$  ne peuvent être que droits.

Cette condition suffisante servira de *définition* d'orthogonalité aux deux couples de droites  $a, b$  et  $a', b'$  des fig. 16 et 17.

La méthode utilisée pour définir l'orthogonalité de deux droites n'est pas la seule possible. On aurait pu, par exemple, après avoir défini le centre d'une circonférence (rubrique *e*), utiliser la propriété des angles inscrits dans une demi-circonférence.

Il peut sembler, à première vue, que la définition de l'angle droit exige l'emploi d'un nombre impressionnant de points et droites. En réalité, une étude systématique de la configuration de ces angles permet de réduire ce nombre à un ensemble de six points et six droites.

La fig. 18 caractérise la propriété des droites  $a$  et  $b$  d'être orthogonales,  $P$  et  $Q$  étant les points cycliques.

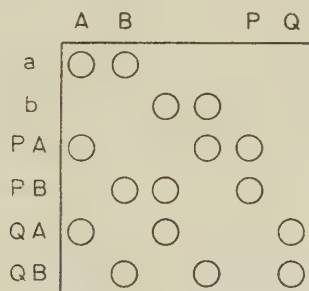


FIG. 18.

Ce procédé a l'avantage de permettre aisément la définition du milieu d'un segment, la droite  $b$  étant la *médiatrice* du segment  $AB$ .

e) *Centre d'une conique ou d'une circonférence.* Lorsqu'un quadrilatère est inscrit dans une conique, le point d'intersection des diagonales est le pôle de la droite joignant les points d'intersection des côtés opposés. Si cette droite, dite polaire, est la droite impropre, son pôle sera le centre de la conique. Telle sera la propriété choisie pour *définir* le centre d'une courbe du second degré dans la géométrie des intersections. Il en sera de même de la définition du centre de la circonférence en tant que conique particulière.

f) *Égalité des segments.* Les définitions qui précèdent permettent

enfin de définir l'égalité de deux segments de droite. Trois cas peuvent se présenter :

— les deux segments AB et CD sont parallèles : l'égalité sera définie en exprimant le parallélisme des droites AC et BD ;

— les deux segments AB et AC ont une extrémité commune : l'égalité sera définie en exprimant la propriété du point C d'appartenir à une circonférence de centre A et passant par B ;

— les deux segments AB et CD sont quelconques : on appliquera les deux premières définitions après avoir construit un segment AE d'extrémité A et parallèle au segment CD.

g) *Égalité des angles*. La définition s'établira par une simple application des angles inscrits à une circonférence.

De l'égalité des segments et des angles, il sera possible de définir l'égalité de deux figures quelconques de la géométrie, à condition toutefois que celles-ci soient parfaitement caractérisées. C'est ainsi, par exemple — et c'est une particularité de la géométrie des intersections — qu'une machine géométrique telle que nous l'envisageons dans cet exposé pourra établir la proposition : deux segments de droite (ou angles, ou triangles, ou circonférences,...) égaux à un même troisième sont égaux entre eux, mais ne sera pas en mesure d'établir le théorème général : deux figures (non précisées) égales à un même troisième sont égales entre elles.

On sait d'autre part que cette dernière proposition est un axiome (donc indémontrable) de la géométrie classique.

On définira, d'une manière analogue, la plupart des concepts ordinairement connus de la géométrie : tangente à une conique, parabole, foyers d'une conique,...

De même, toute propriété, conséquence nécessaire et suffisante de la définition algébrique des courbes supérieures au second degré, pourra servir de définition, si les seuls éléments qu'elle possède relèvent de notions effectivement définies <sup>(1)</sup>.

### 13) *Deux exemples relatifs à la mise en code de propositions géométriques.*

*Premier exemple.* Faire établir par la machine géométrique hypothétique, la proposition que voici : les médiatrices (perpendiculaires menées par le milieu de segments) d'une triangle sont concourantes.

<sup>(1)</sup> Voir, à ce sujet, les propriétés projectives des courbes algébriques dans L. GODEAUX, *Introduction à la géométrie supérieure*, Sciences et Lettres, Liège.

Soit  $A B C$  le triangle,  $x$ ,  $y$  et  $z$  les médiatrices relatives aux côtés respectifs  $BC$ ,  $AC$  et  $AB$ .

a) *Mise en code de la proposition.*

La fig. 18 donne la représentation matricielle (codage) de la médiatrice d'un segment. En répétant ce tableau pour chacune des médiatrices  $x$ ,  $y$  et  $z$  du triangle  $ABC$ , on aura les schémas de la fig. 19.

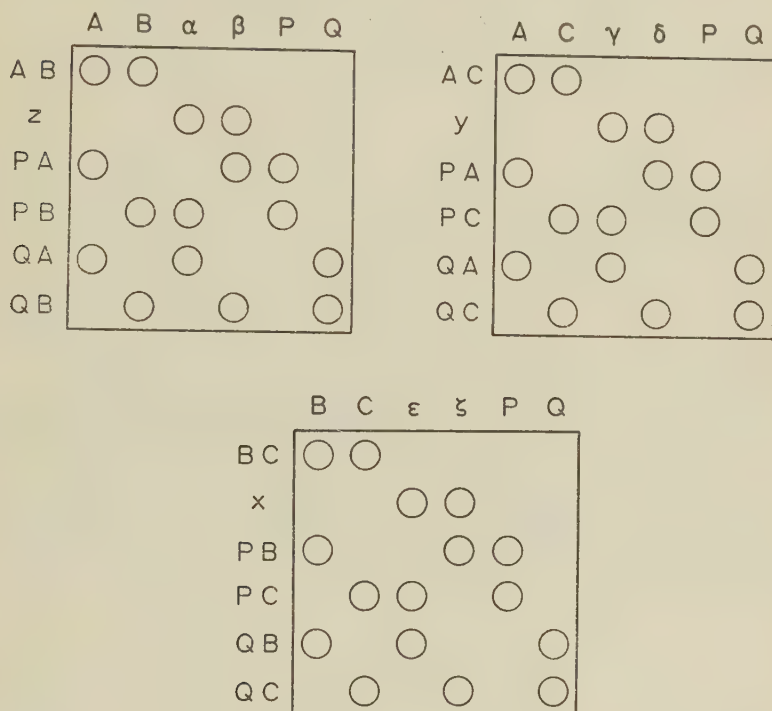


FIG. 19.

En agglomérant ces trois tableaux (tout en veillant, bien entendu, à ne faire correspondre qu'une seule colonne par point et qu'une seule ligne horizontale par droite) et en y ajoutant le point d'intersection  $O$  des médiatrices  $x$  et  $y$ , on obtiendra automatiquement le tableau de la fig. 20. La perforation à faire établir par la machine, perforation qui prouverait que le point  $O$  est également situé sur la droite  $z$  (condition nécessaire et suffisante pour que les trois médiatrices soient concourantes), est caractérisée par une croix.

		A	B	C	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\epsilon$	$\zeta$	P	Q	O
1	a		○	○									
2	b	○		○									
3	c	○	○										
4	PA	○				○		○				○	
5	PB		○		○					○	○		
6	PC			○			○		○		○		
7	QA	○			○		○						○
8	QB		○			○			○			○	
9	QC			○				○		○		○	
10	x								○	○			○
11	y						○	○					○
12	z				○	○							×

FIG. 20.

b) *Démonstration mécanique de la proposition.*

En présence de cette matrice des hypothèses, la machine, conformément à ce qui a été exposé au paragraphe 9 et comme le montre les exemples du paragraphe 10, décèlera la matrice de confection de la fig. 21 qui, comparée à la matrice de base de la fig. 8, prouvera que la perforation à effectuer est bien située à l'emplacement de la croix. La machine aura ainsi démontré la proposition.

		$\beta$	$\delta$	P	$\gamma$	$\alpha$	Q	$\zeta$	$\epsilon$	O
4		○	○	○						
7					○	○	○			
10								○	○	○
8		○					○		○	
11		○			○					○
5				○		○		○		
12		○				○				×
6				○	○				○	
9		○					○	○		

FIG. 21.



*Deuxième exemple.* Faire démontrer par la machine la proposition suivante : les cordes d'intersection de trois circonférences sécantes deux à deux sont concourantes.

Soient  $A$  et  $A'$  les points d'intersection des deux premières circonférences,  $B$  et  $B'$  ceux de la première avec la troisième,  $C$  et  $C'$  ceux des deux dernières.

La proposition sera démontrée si, après avoir explicité le fait que  
1) les deux quaternaires de points  $AA'BB'$  et  $AA'CC'$  sont concycliques,  
2) les droites  $AA'$ ,  $BB'$  et  $CC'$  sont concourantes, on peut prouver que les quatre points  $B$ ,  $B'$ ,  $C$  et  $C'$  sont généralement concycliques.

a) *Mise en code de la proposition.*

Puisque, par définition, une circonférence est une conique passant par les deux points cycliques  $P$  et  $Q$ , il suffira de faire prouver par la machine que si les deux groupes de six points  $PQAA'BB'$  et  $PQAA'CC'$  appartiennent chacun à une même conique et si de plus les droites  $AA'$ ,  $BB'$  et  $CC'$  sont concourantes, les six points  $PQBB'CC'$  appartiendront également à une même conique.

En adaptant la matrice de la fig. 15 (mise en code d'une conique) à chacune des coniques  $PQAA'BB'$  et  $PQAA'CC'$  on obtiendra respectivement les matrices de la fig. 22.

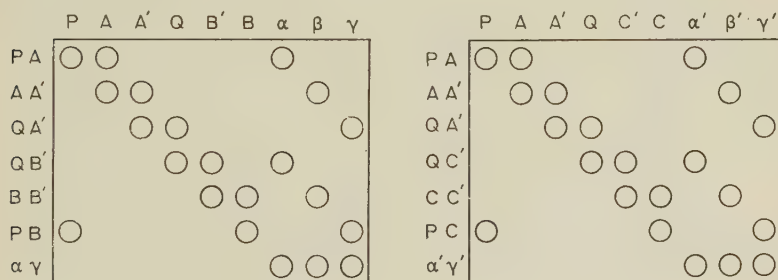


FIG. 22.

Pour démontrer que les six points appartiennent également à une même conique, il suffira de montrer que la matrice de la conique définie par ces six points doit obligatoirement être complète, par exemple en laissant faire établir par la machine une perforation à l'emplacement précis d'une perforation que l'on aura négligé de réaliser sur elle (emplacement de la croix, par exemple, dans la fig. 23).

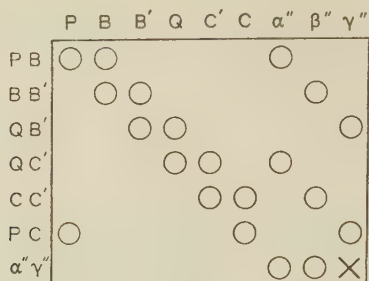


FIG. 23.

En agglomérant les trois matrices ainsi construites et en donnant un point O commun aux droites AA', BB' et CC', on obtiendra automatiquement la matrice des hypothèses (fig. 24).

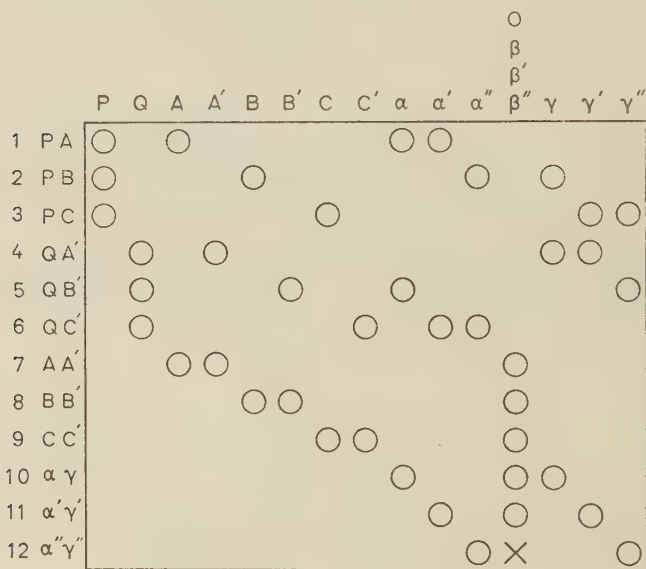


FIG. 24.

#### b) Démonstration mécanique de la proposition.

Comme pour le premier exemple, la machine géométrique mettra en évidence la matrice de confection de la fig. 25 qui, comparée à la matrice de base de la fig. 8, montrera que la perforation à effectuer est bien à l'emplacement de la croix. La proposition sera ainsi démontrée.

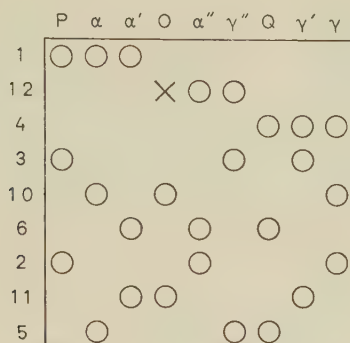


FIG. 25.

14) Il peut arriver que le simple fait de mettre en code une certaine proposition de la géométrie des intersections soit suffisant pour que celle-ci soit démontrée. En effet, en agglomérant les matrices représentatives des définitions des différents concepts intervenant dans l'énoncé d'une proposition, il convient de ne faire correspondre qu'une seule colonne par point et qu'une seule ligne horizontale par droite. Il s'ensuit que des perforations provenant de matrices différentes pourront très bien être obligées de se situer dans une même colonne ou sur une même ligne comme nous avons pu le constater dans les deux exemples qui précèdent. Si par cette opération, une perforation provenant d'une matrice venait à se superposer à une croix provenant d'une autre matrice, la proposition serait automatiquement démontrée avant même que la matrice des hypothèses n'ait été soumise à la machine pour analyse.

Il en est par exemple ainsi pour la proposition que voici bien connue en géométrie analytique : les portions d'une corde comprises entre une hyperbole et ses asymptotes sont égales.

Après avoir mis en code

— l'hyperbole : conique absolument quelconque pour la géométrie des intersections,

— les asymptotes : droites tangentes à la conique aux points de rencontre de celle-ci avec la droite impropre,

— l'égalité des deux segments de même support : par l'intermédiaire d'un segment égal et parallèle mais de support différent, mais en veillant toutefois à négliger une perforation afin de permettre à la machine de l'établir (perforation remplacée par une croix, par exemple),

il suffira d'agglomérer les différentes matrices ainsi obtenues pour constater immédiatement qu'une perforation effective viendra se superposer à la croix.

La démonstration de la proposition n'aura pas dépassé la mise en code.

(à suivre)



# The control of rhythm and homeostasis in biology and medicine

by Reginald J. GOLDACRE,

*Chester Beatty Research Institute, Institute of  
Cancer Research (London)*

---

## INTRODUCTION

In this article an attempt is made to show how the cybernetic approach may be helpful in finding a solution to a wide variety of biological problems, especially those involving self-regulating devices or feedback processes, which express themselves in the organism as a rhythm of some kind, or as state of homeostasis. Particular attention is paid to those cases where a state of homeostasis may change into one of rhythm, and the converse; and those in which the rhythm may vary its period; such changes being a result of experimental interference in the organism or of pathological change. Ways in which these changes might be influenced or counteracted are discussed.

It has been said that "nature might abhor a vacuum but is very fond of rhythms and cycles"; on the other hand, one of the most important properties of living organisms is their power to maintain a state of homeostasis and especially to maintain and restore their organisation on the molecular, microscopic and macroscopic levels in spite of disturbances which they meet. It is probable that most, if not all, of the cases of rhythm and homeostasis result from the operation of feedback cycles (de Latil, 1956). As the properties of feedback cycles become more and more understood, especially as a result of the impetus given by the recent rapid advance of the young science of cybernetics, the possibility becomes greater of a more effective control of the processes in which they express themselves. While the scope of this article is

limited to the biological and medical fields, other fields in which control is desirable, and in which the same principles would apply, extend widely through human activities; examples are: periodic booms and depressions and rhythms in the demand for manufactured goods; periodic wars; periodic epidemics; fluctuations in population density of animals and plants, etc. Some of these have been discussed in detail, in terms of feedback theory, by de Latil (1956), and it is possible to apply rather similar principles in widely different fields; de Latil even discussed the mechanism behind the accumulation of groups of buses on bus routes, alternating with long waits in between.

It is possible to convert, reversibly, a state of rhythm into one of homeostasis by varying a quantity which engineers call the "phase angle" and the "gain" of the feedback process (Wiener, 1948). When these can be identified, in terms of the elements of the particular system under study, a wide measure of control is possible. Thus, Goldacre (1958 a) traced out the path of the feedback cycle responsible for maintaining the constant speed of streaming of *Amoeba proteus*, and was able to convert the streaming at constant speed into a rapid cytoplasmic oscillation, and back again, and also to provoke several new kinds of amoeboid movement.

It is a characteristic of feedback-generated rhythms that attempts at control by purely local or symptomatic treatment usually fail, for the reason that the results of interference in the system cannot be predicted by ordinary "common sense", and indeed are often quite the opposite of what would be expected. Examples of this can often be seen in the attempts of politicians to deal with regularly recurring economic crises, inflation and armament races. Similar remarks apply to attempts to influence a biological rhythm, for example, to treat a menstrual dysfunction (see below), and various periodic illnesses such as manic depressic psychosis and periodic fever.

A mathematical treatment of the kind of rhythm we are dealing with in this communication has been given by Volterra (1926, 1927) who wrote down and integrated the differential equations describing the system. Volterra's conclusions were to some extent verified experimentally by Gause (1935) working on biological systems.

Although Volterra's equations are widely applicable, he considered primarily a hypothetical situation in a lake, containing sharks, smaller fish and unlimited plant food for the smaller fish.

The sharks ate the other fish, whose numbers decreased, whereupon the sharks began to die out from starvation. The fish then multiplied, and the sharks began to feed again and increase in number. The numbers of sharks and other fish rose and fell rhythmically, with the same period of oscillation but with a phase difference between them (this phase difference can be expressed as the "phase angle" used by engineers and physicists).

Of particular interest are Volterra's corollaries, which he worked out to describe the effect of outside interference in the system. As we shall be concerned to a large extent with these corollaries, in dealing with the control of rhythm and of homeostasis, and as we shall be applying them to a variety of systems which we shall discuss later, they are enumerated below; of course, in order to apply them to any particular system, they have to be translated into the terms of the elements of the system, i.e. those elements corresponding to the sharks, smaller fish and plant food have to be identified.

#### VOLTERRA'S COROLLARIES

1. The period depends on the coefficients of increase and decrease of the two species, and on the initial numbers of the two species.
2. The average numbers of the two species tend to constant values, whatever the initial numbers may have been.
3. The steady destruction of the eating species accelerates fluctuations, while destruction of the eaten species retards it.
4. Increased protection of the eaten species increases the average numbers of both.
5. With contemporaneous and uniform destruction of the two species, the ratio of the amplitude of fluctuation of the eating and eaten species tends to increase.
6. If one tries to destroy both species uniformly and proportionally to their number, the average number of eaten species grows and the average number of eating species diminishes.

Other mathematical treatments of feedback-regulated systems have been worked out, for example, those of Nyquist (1932) and of Routh (1905); and the conditions for stability or homeostasis, and conversely for instability or oscillation, have been stated in terms of the "Nyquist diagram" and "Routh's criteria"

respectively. While these methods are useful for engineers, their application involves so much mathematics that it is difficult for the ordinary biologist with moderate mathematical ability to apply them to their problems, and for the purpose of this article it has been found more suitable to consider the somewhat more restricted form of treatment worked out by Volterra, which can more simply and with less manipulation be applied to biological problems. In the next section some examples of the use of Volterra's findings will be given.

### BIOLOGICAL EXAMPLES

#### A. *Cell Division.*

Consideration of the properties of cells undergoing repeated division (such as protozoa and bacteria) suggests a close analogy between the sharks and other fish in Volterra's system with the nucleus and cytoplasm respectively of the cell. Thus the nucleus is nourished by the cytoplasm and the cytoplasm by the material in the external medium; there may be some contribution to the cytoplasm from the nucleus but it must have been derived from the cytoplasm ultimately, and for the present purpose we shall assume that it can be ignored.

Interference in a regularly dividing cell by micromanipulation (amoebae were used owing to their large size) indicated that a change in the cytoplasm initiated a change in the nucleus which reached its maximum extent some time later, and conversely. Thus, cutting away some of the cytoplasm caused a shrinking of the nucleus which reaches its maximum extent some hours later (the cut heals instantly and the cell is not damaged). Cutting away part of the nucleus similarly produced later changes in the size of the cytoplasm. Thus there appears to be feedback between nucleus and cytoplasm operating with a phase lag, and Goldacre (1958 b) suggested that regularly-recurring cell division was a rhythm generated by this feedback process in the same way as the rhythm in the population densities of sharks and other fish in Volterra's system. It was assumed that the rhythmic changes in the chemical and physical properties of nucleus and cytoplasm would periodically trigger off cell division; this triggering was shown by micromanipulation to be independent of the size or age of nucleus and cytoplasm, and of the nucleus-cytoplasm ratio and of the surface-mass ratio. The attainment of critical values of some of



these had previously been suggested as possible triggers of cell division. A more detailed discussion of this feedback theory of cell division is given by Goldacre (1958 b) : it was found possible to test the theory further by interference along the lines suggested by Volterra's corollaries listed above.

*Corollary 2 : The average numbers of two species tend to constant values, whatever the initial numbers may have been.*

This was tested in two ways :

(i) Cytoplasm in amount up to 90 % of the original volume was removed, leaving the cell with much less than that in its normal physiological range. Nevertheless, after the following cell division (which occurred after a longer time than in unoperated amoebae) the cells regained their normal cytoplasmic and nuclear volumes and continued their usual volume doubling up to cell division and halving afterwards, i.e. the physiological size was regained.

(ii) Nuclei were interchanged between young and old amoebae, i.e. between cells which had just divided and those just about to divide. The result was that the older component, whether cytoplasm or nucleus, ultimately grew to twice its normal size just before the subsequent cell division. However, after three or four further divisions the nucleus and cytoplasm regained their normal sizes (Comandon and de Fonbrune, 1942).

Thus, Volterra's prediction for this type of interference was fulfilled.

*Corollary 3. The steady destruction of the eating species accelerates fluctuations, while destruction of the eaten species retards it.*

It was possible to test the prediction that the steady destruction of the eaten species retards fluctuations by cutting away about one third of the cytoplasm every day. Normally, *Amoeba proteus* divides about every two days, but division was prevented by the excisions. When they ceased, or if too little cytoplasm was removed, division occurred (Phelps, 1926 ; Hartmann, 1922).

These and other corollaries tested are described in more detail in Goldacre's (1958 b) paper. Of further interest is the calculated period of the rhythm. Volterra (1926) gives an expression for the period as follows

$$T = \frac{2\pi}{\log_e 2} \sqrt{t_1 t_2}$$

where  $t_1$  = time taken for the eaten species (i. e. cytoplasm),  
to double itself in the absence of the eating species,  
and  $t_2$  = time taken for the eating species (nucleus) to halve  
itself in the absence of the eaten species.

The generation time  $T$  for *Amoeba proteus* under the culture conditions used was 50 hours.  $t_1$  was found indirectly (since an enucleated amoeba does not feed, and consequently does not grow) by comparing the growth rates of mononucleate and binucleate amoebae given by Chalkley (1931); the binucleate amoeba grew more slowly, and the difference was assumed to correspond to the cytoplasm used up by the extra nucleus; by extrapolation to zero nucleus,  $t_1$  was found to be 38 hours. Substituting in the equation,  $t_2$  was found to be 1 hour — a surprisingly short time compared to the other times. Experimentally,  $t_2$  was determined from the rate of shrinkage after varying amounts of cytoplasm had been cut away, and found to be in the region of 1 hour for small amounts of residual cytoplasm. Similar rapid rates of nuclear shrinking after cytoplasm excision were found by Prescott (1956) under somewhat different conditions. Thus, the period calculated from feedback theory is consistent with that found.

#### B. Locomotion of amoeba.

The locomotion of *Amoeba proteus* provides a good illustration of the reversible conversion of a state of homeostasis into one of rhythm.

By cinematography and experiments in capillary tubes and tiny circular tracks, amoebae were found to have a permanent head-tail polarity and to move at constant speed without reversal for times comparable with the generation time (Goldacre, 1957, 1958 a). This was shown to be due to a mechanochemical feedback process regulating the force of contraction of the plasmagel in the amoeba's rear end: contact of cell membrane and plasmagel caused a contraction by enzymic action, and the area of contact was limited and controlled by the force of the contraction itself — too great a contraction reduced the area of contact and vice versa (Goldacre, 1958 a). Thus the speed of streaming was kept constant. In order to produce rhythm in any feedback process, the "gain" of the feedback must be adequate and a quantity which engineers call the "phase angle" must be suitable. This was arranged by flattening the amoeba below its natural thickness by screwing down the coverslip towards the microscope slide with a mechanical cell compressor, so that the phase angle was taken through all its

possible values. It was found that at a critical thickness, about one third of the amoeba's natural thickness, a sudden dramatic change-over occurred, and the cytoplasm oscillated rapidly back and forth, with a period of 1-2 cycles per second and an amplitude of 4-20 microns, instead of moving forward at constant speed as previously, and as it did on releasing the amoeba (Goldacre, 1957. 1958 a). It would be difficult to explain this reversible conversion of a state of homeostasis into one of rhythm in terms of the old surface-tension theory of amoeboid movement or of any other except the feedback theory.

### *C. Ciliary beat.*

Many microorganisms swim through their aqueous medium by the rhythmic beating of fine hair-like processes or cilia on their surfaces. These occur also in various places in higher animals, such as on the trachea of mammals and the mantle of molluscs. The frequency of pulsation is up to about 20 beats per second; the direction of the beat can be reversed by passing a direct current in the appropriate direction at right angles to the cilia, and the beating can be inhibited with 50-cycle alternating current at right angles to the cilia, but not when parallel to the cilia.

In view of this, it is tempting to suppose that ciliary beat might be brought about by a mechanism rather similar to that producing constant speed of streaming in the amoeba, along the following lines: suppose the plasmagel within the ciliary membrane was pressed against the membrane on one side, but not on the other, by a built-in asymmetry corresponding to the functional asymmetry; contact would produce a contraction on one side (as contact does in the amoeba) resulting in bending of the cilium. If now the contracted plasmagel pulled itself, by means of its contraction, away from the ciliary membrane, the contraction would cease, and a new cycle would begin as the plasmagel recovered and made a further contact with the membrane. A direct current could, by electrophoresis, push the plasmagel over to the opposite side of the ciliary membrane and so reverse the direction of beating, while a 50-cycle alternating current, by moving the plasmagel back and forth more rapidly than the cilium could naturally beat, would inhibit the beating.

If this were so, the contraction itself, by inhibiting further contraction, would be a means of producing a feedback-generated rhythm, i. e. ciliary beat.

#### *D. The Krebs cycle and other biochemical cycles.*

Many of the biochemical reactions which have been traced out in living cells follow a circular path, for example, the Krebs cycle for the oxidation of carbohydrate, the ornithine cycle, etc. Many examples of cycles are given by Baldwin (1952) and Rocker (1957). In these cycles each substance produced is in effect an intermediate in its own further formation. We thus have a chain of autocatalytic reactions, representing again the system of Volterra, discussed above, in which for sharks and fish we substitute molecules. The same differential equations can be written for each system, so that the possibilities indicated by Volterra, of stability and of rhythm, are present. It seems likely that the cell is taking advantage in this case of the inherent stability of a chain of autocatalytic reactions, in which the power to regulate back to normal after a disturbance would be of great benefit to a cell struggling against a variety of outside conditions. On the other hand, the latent power of such a system to give rise to rhythm with appropriate change of the phase angle may sometimes be drawn on in generating the numerous rhythms which occur in cells. Lotka (1920) has shown mathematically, and Peard and Cullis (1951) experimentally, that it is possible to produce a rhythmic rise and fall in the concentration of substances in a test-tube, provided that it is arranged for two autocatalytic reactions to follow one another, showing the validity of substituting molecules instead of organisms in Volterra's equations.

Ashby (1952) has discussed the stability of cells and multicellular organisms in the light of the behaviour of his electronic "homeostat" machine, and concludes that the living organism has what he calls "ultrastability". It is possible that some of this could be provided in the cell by the kind of circular chemical reactions described by Krebs and others.

#### *E. Medical applications.*

It is well known that, in mammals, there are homeostatic devices for keeping constant conditions in the medium bathing the cells (Cannon, 1939). Temperature is kept constant by a number of devices including sweating, panting, erecting hairs, shivering, constricting or dilating surface blood vessels, etc. The composition of the blood is kept fairly constant by the activity of the kidneys and other organs. While homeostasis is the rule, rhythms may sometimes appear, especially in pathological conditions, as if a



phase angle change had been brought about by the presence of toxins and so forth. For example, infections of the common cold often produce a subjective feeling of being alternately too hot and too cold. In "periodic fever" (Reimann, 1951), an actual rhythmic rise and fall in temperature occurs. Again, in manic depressive psychosis, the alternation of states of elation and depression suggest a phase angle change due to a slowing down of some feedback process which would normally keep the emotions on a steady level. Let us consider in more detail some particular instances :

(i) In love affairs, in which the emotional level is a result of the mutual interactions of two persons, feedback fashion, two kinds of states are possible — one, a harmonious calm steady state of well-being which may persist for years, and the other, a state which can alternate between ecstasy and despair. It would be interesting to change experimentally the phase angle, so that the former state might be perhaps converted into the latter, and vice versa. This might be done by, say, separating the two partners A and B by increasing distances or other obstacles so that the time required for A to influence B and B, being modified, to reinfluence A, and so on, is lengthened ; one might expect to find a critical time lag which would convert the state of homeostasis into a rhythm. Perhaps this is what is unconsciously done by girls who voluntarily travel far away from an unromantic partner, so that when the ecstasy-despair oscillation starts the critical emotional level needed to trigger off a proposal of marriage is exceeded. Experiments of this type, in which the lag or "phase angle" alone would be modified, presuppose that the "gain" of the feedback is already adequate for oscillations to occur ; in this case, that the reactions of A have a large significance for B, and vice versa.

With positive feedback, excitation in A would produce an increase in excitation in B, which in turn would react to produce an increase in A's excitation eventually reaching a level limited only by the saturation of the capacity to react. With negative feedback an increase in A would produce a change in B resulting in a decrease in A, after a time depending on the individual's reaction rate to a given situation. Whether rhythm or homeostasis became the result of the interaction would depend on the values of the parameters involved. While this discussion is oversimplified and other factors are involved, it might be helpful, to psychologists or amateurs interested in controlling such emotional situations, to consider manipulating the parameters.

(ii) In menstruation, the monthly rhythm has sometimes been considered to have been derived from a cyclic lunar influence of some kind ; however, all women do not menstruate in synchrony and moreover the period of the rhythm, while having an average of about 28 days, may in some women be as little as 21 days, or as much as 35 days, or even outside these limits, and the period may vary from time to time ; so that whatever the distant origin of the rhythm, there must be at present independent rhythm-generators in each individual.

While menstruation is the result of the interaction of a number of endocrine glands, it is determined for the most part by the interaction of the ovary and the pituitary gland. A secretion of the pituitary gland stimulates the ovary to produce its hormone, which in turn inhibits the pituitary secretion. These hormone effects are not instantaneous, but require some days or more to become fully effective. This time lag results in a rhythmic rise and fall in the hormone level (triggering off menstruation at a critical level) rather than a state of homeostasis which would occur if there was no time lag or "phase angle". Referring now to Volterra's equations (1926), the ovarian secretion corresponds to the sharks and the pituitary secretion to the smaller fish, at least for moderate variations in secretory activity. It will be interesting to consider the possible causes of the various rhythms, and of the changes in the rhythm, in terms of Volterra's concepts. What, for example, would be the difference in glandular activity between a 21-day and a 28-day rhythm ? What would be the effect of, say, doubling the secretion rate of both ovary and pituitary ? Answers to this kind of question can be worked out from Volterra's corollaries.

According to Volterra's corollary 2, the average level of the two hormones tends to constant values, whatever the initial levels might have been, so that very large excursions of hormone level are not possible, in spite of any intrinsic potentiality of the glands. If, however, the ovarian hormone is prevented from reacting on the pituitary gland by some means, then the average level of both hormones should rise (corollary 4), and if that one of the hormones corresponding to the eating species (i. e. ovarian hormone) is steadily destroyed, then the frequency of the rhythm is increased (corollary 3), whereas if the hormone corresponding to the eaten species (pituitary hormone) is steadily destroyed, then the frequency of the rhythm is decreased. Thus, menstruation at intervals of 35 days could be a result of a destruction or using up of

the pituitary hormone by some process, and menstruation at intervals of 21 days could similarly be a result of the using up or destruction of ovarian hormone.

From corollary 5, with contemporaneous and uniform destruction of both hormones, the ratio of the amplitude of fluctuation of each hormone tends to increase.

From corollary 6, if one tries to destroy both hormones uniformly and proportionally to their amounts (say, by partial excisions of the corresponding glands, or by injecting anti-hormones), the average level of the pituitary hormone would increase, and the average level of the ovarian hormone would decrease. The converse would also be true.

How hormones are destroyed in the body is not very well understood. They may be destroyed as a result of their biological action, i. e. by modification by the receptor cells; or they may be excreted in the urine; or protein hormones may be destroyed by proteolytic enzymes. An interesting experiment was recently reported by Hulth and Westerborn (1959), who produced dwarf rabbits by injecting papain repeatedly into young ones during the growth period. The long bones grew much less in the treated animals. While these authors did not give this explanation for the effect, it may be that protein hormones from the pituitary were partly destroyed by the papain.

These inferences might be of some use in the treatment of various menstrual dysfunctions (see, for example, Southam, 1959) or cases of hormonal imbalance. It must be mentioned that the hormones involved are not simple or single but several separate hormones are secreted by both ovary and pituitary (Rock *et al.*, 1959) and to that extent the actual situation is somewhat more complex than that considered in the discussion above.

(iii) "Periodic disease" is a name given to cases of regularly recurrent and intermittent episodes of fever or oedema, or arthralgia, or gastric pain and vomiting, etc., in which the rhythmic attacks continue for many years without further development in otherwise healthy individuals (Reimann, 1951). There are also mental illnesses which show a rhythm, phases of depression or hypomania alternating in a regular way with days or weeks of normal mood, or of attacks of excitement and agitation, occurring, for example, in cases of manic depressic illness and catatonic schizophrenia. Crammer (1959) describes a case of schizophrenic catatonic disturbance in which cycles of hallucination

alternating with relatively normal behaviour occurred 6 times each year continuously for 32 years. Patients with 4- and 6-weekly cycles were not uncommon in both sexes, and shorter periods also occurred, 52 cases with a 2-day cycle of overactive followed by underactive behaviour being listed by Menninger-Lerchenthal (1950). Crammer (1959) described in detail a manic-depressive case with a 6-day cycle extending over 10 years, each consisting of 2 days of a semi-stuporous state and four days of increasingly cheerful talkative overactivity. The pulse rate was about 60 % faster in the manic phases than in the depressed phases, urine was excreted in 3-4 times the amount, and a cyclic gain and loss of weight of 3-4 kg occurred with maxima (in the manic phase) at 6-day intervals.

These rhythms suggest disturbances in various homeostatic mechanisms. Just as it was possible to provoke a rhythm in the amoeba by changing the phase angle of the feedback process regulating the speed of locomotion, so it should be possible to provoke other homeostatic mechanisms into rhythm, by processes well known to engineers.

Recently, it has been shown that the isolation of human subjects from all visual, auditory and tactile stimuli can give rise to hallucinations and delusions of various kinds, with oscillation of feelings and the impairment of cognitive function and perception (Heron *et al.*, 1953, 1954, 1956; Lilley, 1956); the mental phenomena aroused bore a resemblance to those occurring in dreams and in schizophrenia, and the associated emotions were so unpleasant that many of the subjects could not tolerate isolation for more than a day. It would appear that the normal human mind keeps itself in a stable state by feedback through the environment, and that when this channel to and from outside is disconnected a homeostatic mechanism maintaining mental stability is unable to function.

It is not clear to what extent neuronal feedback mechanisms and to what extent chemical mechanisms are involved in regulating mental stability, though it seems likely that both are involved in different spheres. Chemical changes in the blood have been reported as accompanying various disturbed mental states. To know whether these chemical changes are primary or secondary events would be of considerable therapeutic importance. In "periodic paralysis" described by Vaughan Jones *et al.* (1959), rhythmic changes in the concentration of potassium and sodium ions in the blood occur of such a magnitude as to affect the ability of the muscles to contract, resulting in the periodic paralysis.



Normally, the concentration of blood electrolytes is kept constant, so that the rhythm appears to be due to a disturbance of this homeostatic mechanism, of the change in phase angle type. It is interesting in this connection that a hormone concerned with the control of electrolytic balance — aldosterone — is also found to vary rhythmically in concentration in the blood in this disease.

“Periodic neutropenia” is a disease characterised by a rhythmic rise and fall in the number of neutrophil white cells in the blood. Sixteen cases have been summarised by de Beradinis (1949). The neutrophil count may vary rhythmically over a ten-fold range; ulcers, headaches and malaise were associated with the troughs. In one case the rhythm persisted, with a period of about 3-5 weeks, for 34 years. It seems that this disease (which, in contrast with leucaemia, is benign) is due to a disturbance of the phase change type, of the homeostatic mechanism which normally keeps the neutrophil count constant.

Reimann (1951) in reviewing a large variety of periodic illnesses — including periodic purpura and periodic oedema with a 4-6 weeks period, cyclic vomiting, periodic hypothermia with a 5-7 day period, thrombopenia with a 27-day period, periodic swelling in one breast of an impotent man with a 2-week period, a periodic herpes-like eruption on the penis of a 30-year old man every 2 weeks for 7 years, outbreaks of myasthenia gravis at 2-3 week intervals, a case of a 42-year old woman who had menstrual periods, lasting 1-2 days, recurring once a week for 4 years — points out that there is no satisfactory theory for explaining these rhythms, and suggests that “some mysterious underlying rhythm provokes different latent diseases into periodic activity”.

However, since it is known that the body regulates itself by a wide variety of homeostatic mechanisms, it is to be expected that under some conditions it should be possible to provoke rhythms; and it is interesting that rhythms in such a variety of bodily functions have actually been recorded, and that in some at least of these (such as bodily temperature, blood count) homeostatic mechanisms are acknowledged to be operating.

There must be a great many homeostatic mechanisms in the body, both within the cells and also governing their interactions. Rhythm is inherent in each one, and may break out under appropriate conditions of “phase angle” and “gain” of the feedback. In engineering, the designer is frequently concerned with the maintenance of stability and the avoidance of undesirable rhythms; examples of the latter are: the destruction of the Tacoma

bridge in the U. S. A. owing to oscillations set up by the wind ; the "hunting" of gun aimers and predictors, and of petrol engines driven at low speed ; in human physiology, there occur exaggerated and excessive movements in Parkinson's disease when a person so afflicted attempts, say, to pick up an object — his hand travels too far one way, then too far in the opposite direction, owing to the degeneration or absence of stabilising feedback mechanisms.

The nature of the periodic diseases in humans suggests that the rhythm is a result of a change in the phase angle, or gain, or both, of some feedback process whose primary purpose is to confer stability.

(iv) The compulsive repetition of words and phrases which occurs in stuttering has been attributed to regenerative feedback loops in the human brain (Wiener, 1948). It is characteristic that it tends to occur more under conditions of nervousness, where inhibition of some of the usual outlets or neurone pathways would result in the using of longer pathways, with a consequent change of phase angle, introducing the possibility of oscillation.

If this is so, one would expect that as nervousness increased, and the phase angle shift went from 0 to  $2\pi$ , the rhythm should once again disappear. There seems to be some psychiatric evidence that stuttering can disappear under extreme nervousness (Hayes, 1959).

Stuttering seems to be partly mediated through auditory feedback. Thus, if a loud sound is played into the ears of a stutterer through earphones, so that he cannot hear his own voice, the stutter disappears (Cherry and Sayers, 1956). On the other hand, with normal non-stutterers, if the sound of the voice is played back through earphones with a delay time of a few tenths of a second, stuttering can be provoked. Regeneration would occur through the feedback loop : voice — amplifier — ear — brain — voice.

In senile men, there is sometimes a tendency to repeat what they wish to convey several times. The degeneration of a proportion of the neurones in the brain which is known to occur with old age may force the utilisation of longer neurone pathways, introducing a phase shift resulting in the repetitive behaviour.

#### AGEING AND SENESCENCE

In previous sections the emphasis has been on feedback-generated rhythm ; in this section we have to deal with an aspect of homeostasis.

Numerous investigations into the phenomena of ageing in man and other organisms have provided data showing that old age is accompanied by changes in the physical properties and chemical composition of the tissues, organs and cells; for example, a decrease in water content of the body, a change in the concentration of various blood constituents, a change in the elasticity of fibres, the deposition of granules within nerve cells etc. (for reviews, see Wolstenholme *et al.*, 1955-58; Cowdry, 1952; Comfort, 1956). It seems to the author that one should not seek for the cause of old age in any one or more of these changes, which may be regarded as secondary events; the primary event would *ipso facto* be the failure of the homeostatic mechanisms in the body to maintain a constant physical and chemical state in the cells and tissues. Once the restorative processes and homeostatic mechanisms weaken or fail, the way is open for hosts of secondary changes to follow. It is well known, for example, that wounds take longer to heal in old men than in young; recovery after illness or injury takes longer, or may not occur at all; and old men may frequently be seen wearing much warm clothing in hot weather. These facts indicate a general weakening of the homeostatic mechanism of the body, the loss of which would be much more serious than any other change, which, in the presence of active homeostatic mechanisms, would ultimately be counteracted.

Similar remarks apply to attempts to greatly prolong the life of cells or tissues by cooling to a low temperature. Since the discovery of Polge, Smith & Parkes (1949) that spermatozoa could be protected against the otherwise fatal effects of freezing by the addition of glycerol to their suspending medium (which prevents the production of ice crystals and produces a glassy state instead), many types of living cell have been preserved at low temperatures for periods greater than their normal life span. However, living cells do not necessarily survive for long periods when their temperature is lowered to a level sufficient to reduce metabolism to a negligible value. Thus, survival of red cells is poor at  $-20^{\circ}\text{C}$  and not complete at  $-78^{\circ}\text{C}$  (Lovelock, 1956); as Lovelock (1956) points out, the living cell is a dynamic entity not in equilibrium with its environment, and its internal organisation is maintained by active processes. These are greatly slowed by cooling, but the forces disrupting organisation — diffusion and the like — are relatively little affected by cooling. Hence reducing metabolism to a negligible level will, in time, allow disorganisation of the cell to continue and be unrepaired, unless the cell is perfectly dry, or

diffusion made negligible by being frozen into the glassy state. Lovelock further points out that senescence is inevitable also on account of the degradation of the information originally stored in the cell with the passage of time, or a blurring of information as a result of outside interference, eventually becoming too blurred for the cell to function ; just as messages can be " rejuvenated " by sending the same message over an adjacent channel and combining them, i. e. increasing the redundancy according to the information theory of Shannon & Weaver (1949) (since the probability of losing the same item of information in each channel is small) so cells may be rejuvenated by the natural process of conjugation (Calkin and Summers, 1941).

Conjugation or sexual reproduction is practically universal throughout the plant and animal kingdoms, so that accidental damage to genetic material could be restored by the mating process. It is interesting to inquire into any living material where sexual processes are absent, in order to consider how the degradation of genetic information which might occur with age is dealt with, or how it expresses itself, if it is not dealt with.

While many amoebae have sexual phases, the much-studied large species *Amoeba proteus* appears to have none, multiplying by binary fission and mitosis indefinitely. However, it would appear to resist degradation of its information by being highly polyploid, having many hundreds of tiny chromosomes instead of the few dozen or less possessed by most organisms. This great redundancy of information is reflected in this amoeba's unusually large resistance to the damaging effect of X-rays : about one thousand times the dose in Roentgens is required to kill an amoeba as is required to kill a rabbit, which has the normal diploid number of chromosomes (Danielli *et al.*, 1952).

Like this amoeba, the somatic cells of the body, and tumour cells, multiply only by mitosis, with no mating. It is of great interest, therefore, to find that where such cells have been grown for many years in tissue culture, or, in the case of tumours, by successive passages through host animals, a change in the character of the cultured cells may take place. This type of experiment has only been going on for a few decades, i. e. a time not long compared with the lifetime of the animals originally providing the cells. Already, however, it has been reported that marked changes have occurred in some cultured cells ; for example :

(a) the Walker tumour ; this was first isolated in 1928 and has been propagated by serial passages through host rats ever since ;



it has changed its nature over this period from having at first the characteristics of a carcinoma to having, at present, characteristics of a sarcoma (Earle, 1935).

(b) hormone-dependent tumours; it is well established that some cases of hormone-dependent tumours become less dependent or independent of the hormone supply as they progress and become more malignant with age (a factor limiting the efficiency of hormone therapy), or on serial passage through host animals (Horning, 1949). Horning described a stilboestrol-induced hamster kidney tumour, which was originally hormone-dependent, but after many serial passages through host hamsters lost its hormone dependency.

(c) Earle (1950) and his colleagues have described how normal cells, maintained in tissue culture over many years, sometimes become malignant.

It is noteworthy also that malignant disease in man and other animals is associated with old age, and that tumour cells have an antigenic (and probably a genetic) deficit compared with the normal cells from which they are derived (Weiler, 1956), indicating a loss of information.

(d) Normal cells from a wide variety of tissues when cultured for months or years may change their morphological, physiological and chemical properties (for review, see Parker *et al.*, 1957). For example, the cell may alter in its response to infection by virus, or to a drug or to a medium (without necessarily becoming malignant). The alteration of the culture was shown, by single cell isolation experiments, not to be due to a selection process. The observed absence of reversion to the parent cell type would be consistent with a loss of some of the cell's built-in information, which would be unlikely to be restored by further damage or accidental processes.

It is not difficult to see how, if such changes are inevitable in somatic cells, which are never "rejuvenated" by conjugation, then the metazoon body will have to function with fewer and fewer effective cells, and sooner or later a stage will be reached where the restorative power of the homeostatic mechanisms of the body will be inadequate to counteract the effect of a moderate insult or stress, leading to decline and death. There is evidence that the forces in the cell tending to restore genetic damage are rather weak; nature tends to rely on profligacy or prolificity, together with conjugation, rather than to provide protecting homeostatic

mechanisms for the genes. There is, however, an indication of a repairing mechanism in paramecium for damage which would ultimately affect the gene (Kimball *et al.*, 1959); if paramecia are damaged by X-rays and prevented from dividing by keeping them on a maintenance diet, insufficient to allow of any increase in number, then the damage appears to be largely repaired; if, however, the organism is well fed, the damage appears in the next few generations. The act of cell division seems to "fix" the damage, which would otherwise slowly be repaired. One is tempted to consider such an explanation for the finding (for review, see Comfort, 1956), that many animals kept on a starvation diet which delays maturity (and presumably slows the rate of cell division) can live to much greater ages than well-fed control animals. Further support for the correlation between length of life and rate of cell division is provided by the fact that the length of life, amongst mammals, is roughly proportional to the time required to reach sexual maturity (Wolstenholme, 1955).

Since the theme of this article is the control of homeostasis and rhythm, we have to consider (a) whether a flagging homeostatic mechanism in an ageing animal might be restored, and (b) whether it might give rise to a rhythm under some circumstances.

(a) In view of the above discussion, there would seem to be little one could do to strengthen a homeostatic mechanism within a cell whose loss of efficiency was due to genetic damage or a blurring of cell-regulating information. Information and entropy are somewhat similar; information is like negative entropy — "neg-entropy" (Brillouin, 1956) — and, as entropy tends to increase, so information tends to decrease, as a result of random processes. By comparing animals of different longevity, one might find a clue to what goes on; the most obvious generalisation is that animals which mature slowest live longest (Cowdry, 1952). They presumably have the slowest rate of cell division especially amongst animals of comparable size, and this again is consistent with the effect of starvation on increasing length of life, both in mammals and in X-rayed paramecia, i. e. a longer intermitotic interval. In short, if cell division renders permanent a loss of genetic information occurring in the intermitotic period, then it an organism is to have a long life it would appear necessary to slow down cell division, or to restore the information by increasing the redundancy:

(i) by introducing fresh genes by a mating process, or

(ii) by having a larger animal with more cells in each organ.

Organisms appear to have an initial redundancy of information in the egg which could prevent errors in development due to inevitable slight loss of information when information is transferred from place to place in the developing embryo. Thus, under some circumstances, whole organisms may be produced from single cells taken from developing eggs at the 2-, 4- and sometimes 8-celled stages, but not at the 16- and 32-cell stages (when defective embryos are produced) (Driesch, 1891) as if there was up to an 8-fold redundancy of information needed for development.

Using a different approach, Szilard (1959) has estimated (from a consideration of X-ray damage to chromosomes in a theoretical study) that senescence would occur when the number of fully functional cells in the animal had fallen (as a result of chromosome damage due to natural radiation and other *noxiae*) to about one sixth of that in a young adult, giving a comparable figure for redundancy in this somewhat different sense.

(b) Rhythms may be generated in a system originally in a state of homeostasis if the phase angle of the feedback process is altered suitably, and the "gain" of the feedback is adequate. With an ageing feedback system the gain is likely to become less, so to this extent rhythm is unlikely, unless an associated change in the phase angle (for example, due to a slower response in a flagging homeostatic mechanism) occurred before the gain fell too much. In old men, several kinds of rhythm may appear, for example, a tendency to repeat themselves, tremors, etc. These are probably of nervous origin involving longer neural pathways in a degenerating nervous system, bringing about a change in the phase angle.

## DISCUSSION

Some examples have been given above of rhythms, at the cellular and supercellular level, which appear to be expressions of self-regulating devices or feedback mechanisms in the system concerned. In some cases, the rhythm is the normal state; in others, the rhythm is an abnormal condition, the normal condition being homeostasis. The question arises as to whether there is any general method for converting one state into the other and back again; if there were, it would be particularly useful in some of the "pe-

riodic diseases" mentioned above, as these have appeared somewhat mysterious and, as their chronic nature suggests, have remained relatively intractable.

In many cases, it seems possible to identify a Volterra-type of situation in the system giving rise to the medical rhythm; in some cases, two fluctuating quantities, waxing and waning out of phase with one another can be observed (e. g. the pituitary and ovarian hormones in menstruation); in other cases, a rhythm in only one entity is apparent, but an accompanying "hidden" rhythm with a phase difference may be assumed in some other appropriate entity. For example, in periodic fever, though it is a rhythm in temperature that is conspicuous, it must be accompanied, but with a phase or time lag, by a rhythm in some heat-producing mechanism or heat dispersing mechanism, and so on. In the general case, there will be two quantities, A and B, reacting on one another in such a way as to cause maxima and minima in the quantity of each, but at different times. The system A-B might represent Volterra's predator-prey system, or the nucleus-cytoplasm system of a cell, or elation- and despair - producing substances in a manic depressive psychosis, or substances or influences promoting respectively increase and decrease in the neutrophil count, as in "periodic neutropenia".

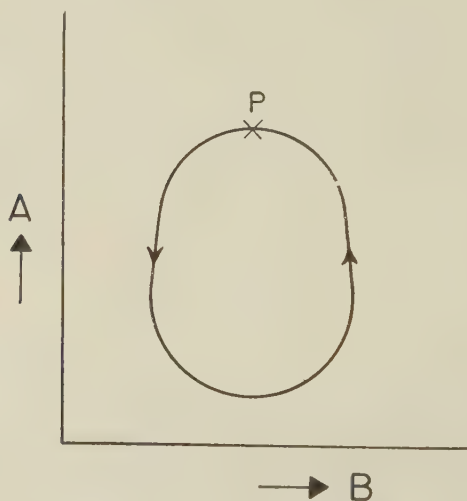


FIG. 1. — Scheme showing rhythm in two interacting quantities A and B, under appropriate conditions of phase angle and gain, as in a Volterra-type situation (after Volterra, 1926).



The rhythm might be represented by a closed loop and a directional arrow (fig. 1). Some effects of interfering in such a system can be predicted from Volterra's corollaries, given above. These indicate ways of modifying the frequency and the amplitude of the oscillation. While it would be desirable to identify the A and B of the system under study with Volterra's "eaten" or "eating" species, it would not be necessary for the most part to specify which was which as there are only two possibilities, which could easily be distinguished after one trial at interfering in the system, so that it should be possible to make predictable modifications in the system without having to go into a detailed analysis of the system beforehand.

Volterra (1926) also showed that his system had stability. Thus, if, at point P in fig. 1, where B is decreasing in amount, we introduce some B into the system, it does not stop the oscillation, but merely shifts its centre of gravity (fig. 2), which, however, returns to its original point after a number of cycles.

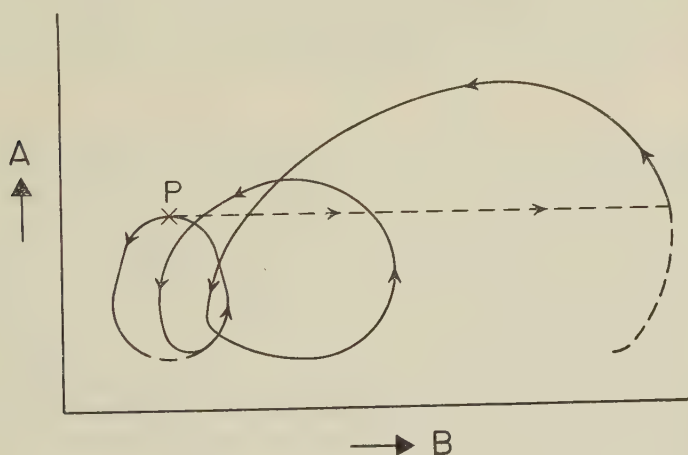


FIG. 2. — Scheme showing effect of an addition of a quantity of B to the system at point P in fig. 1; centre of gravity of the cycle is displaced, but eventually returns, after a number of cycles, to the original point. (After Volterra, 1926, and Gause, 1935).

This has been shown experimentally by Gause (1935) working with a system containing paramecium feeding on a growing yeast culture.

Thus, symptomatic treatment has no effect in preventing a rhythm; it would not be effective, for example, to seek to cure a manic depressive psychosis by administering sedatives in the manic

phase or stimulating substances in the depressed phase (as is well known) nor would administering neutrophil cells in periodic neutropenia at the descending phase of their cycle in the blood have more than a transient effect on the rhythm.

To destroy the rhythm and restore homeostasis it appears that one must operate on the time lag or phase angle, which has become too great. Here again there is scope for all the ingenuity which the investigator can muster, on the particular problem in hand. It is not difficult to see how, in general, a time lag might be introduced into the response of some element in a homeostatic mechanism by toxic substances or injury of some kind, so that the system swings over into a rhythm. The problem would be then, to look for and correct some specific injury, on the basis of cybernetics and the specific physiology of the system, rather than to entertain some mysterious cosmic influence at work.

In contrast to diseases involving regular rhythms, there are illnesses maintained by homeostatic mechanisms, with "vicious circles" or feedback loops. For example, the excessive pain which a fair proportion of civilised human females seem to suffer at child-birth is considered by Reid (1956) to be a result of the feedback loop

fear → tension → pain → fear → ...

and he claims to have abolished much of the pain by breaking the feedback loop at the point "fear", by education or indoctrination.

Similarly, in individuals who repress their aggressive feelings, the feelings turn inwards<sup>(1)</sup> upon the person himself, provoking, through the injury, further feelings of aggression (i. e the tendency to abreact the experience), and so the situation is perpetuated through this feedback loop without the need for the continuing presence of the original object provoking the aggression. Tension maintained in this way may persist for years unless discharged in some violent activity (Sargant, 1949).

There have been recent reports that chronic pains, difficult to connect with any injury and appearing to be maintained by regenerative nervous pathways have been abolished by single injections of local anaesthetics at appropriate sites to interrupt the regeneration; but this work requires confirmation.

---

<sup>(1)</sup> Objective signs of this include lip-biting, breast-beating and hair-tearing; however, the major part of the reflexive action appears to be within the mind.

In this article we have not mentioned the rhythms in the reproductive periods of some plants and animals controlled by the relative lengths of light and dark periods (" photoperiodicity "), nor the many remarkable rhythms of feeding and breeding in animals, adjusted closely to the time of day, month, or year, or to particular high or low tides occurring perhaps only once a year. Many examples are given by Brown (1959). While the mechanism of these rhythms is not well understood there appears to exist an intrinsic tendency to rhythm which can, in some cases, lock itself in phase with external physical rhythms, by some process of " entrainment ". When the organism is shielded from the effects of the external rhythm, the natural rhythm may persist but without such an exact synchronisation as before with the period and phase of the formerly imposed rhythm.

It may well be that feedback-generated rhythms may be found to be at the basis of our sense of time, and of " biological clocks " in general.

## SUMMARY

1. The role of feedback cycles in maintaining states of rhythm and of homeostasis is discussed, and ways in which rhythm and homeostasis can be converted into one another indicated. The application of Volterra's (1926) work, to predict the result of outside interference on the frequency and amplitude of a rhythm is shown.

2. The widespread existence of control mechanisms of the feedback type in living organisms is pointed out, both in connection with maintaining physiological homeostasis and normal physiological rhythms. (Sometimes a homeostatic mechanism may be revealed by provoking it into a rhythm). Some examples of reversible conversion of homeostasis into rhythm in the living cell are given, and an attempt is made to interpret various human " periodic diseases " and pathological rhythmic states in terms of a conversion of a normal state of homeostasis into a pathological state of rhythm by a change of the " phase angle " type. Some suggestions for dealing with these situations are made.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by grants to the Chester Beatty Research Institute (Institute of Cancer Research, Royal Cancer Hospital) from the Medical Research Council, the British Empire Cancer Campaign, the Jane Coffin Childs Memorial Fund for Medical Research, the Anna Fuller Fund and the National Cancer Institute of the National Institutes of Health, U. S. Public Health Service.

## REFERENCES

- ASHBY, W. Ross, *Design for a brain*. Chapman & Hall, London, 1952.  
BALDWIN, E., *Dynamic aspects of biochemistry*. 2nd ed., Cambridge, 1952.  
BERADINIS, H. A. R. (de) and Beradinis, C. T. (de), *Blood*, **4**, p. 1109, 1949.  
BRILLOUIN, L., *Science and information theory*. Acad. Press, New York, 1956.  
BROWN, F. A., *Amer. Scientist*, **47**, p. 147, 1959.  
CALKIN, G. N. and SUMMERS, F. M., *Protozoa in biological research*. Columbia, N. Y., 1941.  
CANNON, W. B., *The wisdom of the body*. Norton, 1939.  
CHALKLEY, H. W., *U. S. Pub. Health Reports*, **46**, p. 1736, 1931.  
CHERRY, C. and SAYERS, B. M., *J. Psychosomatic Res.*, **1**, p. 233, 1956.  
COMANDON, J. and FONBRUNE, P. (de), *C. R. Soc. Biol.*, **136**, p. 763, 1942.  
COMFORT, A., *Biology of senescence*. Routledge & Kegan Paul, London, 1956.  
COWDRY, E. V., in LANSING, A. L., *Problems of ageing*. Baltimore, Williams & Watkins Co, 1952.  
CRAMMER, J. L., *Brit. Med. J.*, **1**, p. 545, 1959.  
DANIELLI, J. F. et al., *Nature*, **170**, p. 921, 1952.  
DRIESCH, H., *Zeitsch. Wiss. Zool.*, **53**, p. 160, 1891.  
EARLE, W. R. et al., *J. Natl. Cancer Inst.*, **10**, p. 1105, 1950.  
EARLE, W. R., *Amer. J. Cancer*, **24**, p. 567, 1935.  
GAUSE, G. F., *Actualités scientifiques et industrielles*, **277**, tome IX, Hermann et Cie, 1935.  
GOLDACRE, R. J., *New Scientist*, **3**, n° 27, p. 23, 1957.  
GOLDACRE, R. J., *Proceedings of the 1st International Congress on Cybernetics*, Namur, 1956, p. 715, Gauthier-Villars, Paris, 1958a.  
GOLDACRE, R. J., *ibid.*, p. 726, 1958b.  
HAYES, J. S., Private communication, 1959.  
HARTMANN, M., *Arch. Protistenk.*, **49**, p. 375 and 447, 1922.  
HERON, W., BEXTON, W. H. and HEBB, D. O., *Amer Psychologist*, **8**, p. 366, 1953 ; see also BEXTON, HERON and SCOTT, T. H., *Canad. J. Psychol.*, **8**, p. 70, 1954 and HERON, DOANE, D. K. and SCOTT, *ibid.*, **10**, p. 13, 1956.  
HORNING, E. S., *Brit. J. Cancer*, **3**, p. 211, 1949.  
HULTH, A. and WESTERBORN, O., *Exp. Cell. Res.*, **17**, p. 543, 1959.



- KIMBALL, R. F., GAITHER, N. and WILSON, S. M., *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **45**, p. 833, 1959.
- LATIL, P. (de), *Thinking by machine* (trans. Y. M. GOLLA). Sidgwick & Jackson, London, 1956.
- LILLEY, J. C., *Psychiat. Res. Repts*, **5**, p. 1, 1956.
- LOTKA, A. J., *J. Amer. Chem. Soc.*, **42**, p. 1595, 1920.
- LOVELOCK, J. E., *Ciba Foundation colloq. on ageing*, **2**, p. 215, 1956.
- MENNINGER-LERCHENTHAL, E., *Wien Z. Nervenheilk.*, **3**, p. 261, 1950.
- NYQUIST, H., *Regeneration theory*, Bell System Tech. J., **9**, p. 126, 1932.
- PARKER, R. C., LARROY, N. C. and McCULLOCH, E. A., *Spec. Pub. N. Y. Acad. Sci.*, **5**, p. 299, 1957. See also PUCK, T. T., *ibid.*, p. 291.
- PEARD, M. G. and CULLIS, C. F., *Trans. Far. Soc.*, **47**, p. 616, 1951.
- PHELPS, L. A., *Trans. Amer. Mic. Soc.*, **45**, p. 133, 1926.
- POLGE, C., SMITH, A. V. and PARKES, A. S., *Nature*, **164**, p. 666, 1949.
- PRESCOTT, D. M., *Exp. Cell. Res.*, **11**, p. 94, 1956.
- REID, G. D., *Childbirth without fear; principles and practice of natural childbirth*. 3rd ed., Heinemann, London, 1956.
- REIMANN, H. A., *Medicine* (Baltimore), **30**, p. 219, 1951.
- ROCK, J., GARCIA, C. and MENKIN, M. F., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **75**, p. 831, 1959.
- ROCKER, R., in «Harvey Lectures», Academic Press, N. Y., p. 143, 1957.
- ROUTH, E. J., *A treatise on the dynamics of a system of rigid bodies* (Part II). Macmillan, 6th ed., 1905. See also J. Clark MAXWELL, *Proc. Roy. Soc.*, **16**, p. 270, 1868.
- SARGANT, W., *Proc. Roy. Soc. Med.*, **42**, p. 367, 1949.
- SHANNON, C. & WEAVER, W., *The mathematical theory of communications*. Urbana, Uni. Illinois Press, 1949.
- SOUTHAM, A. L., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **75**, p. 840, 1959.
- SZILARD, L., *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.*, **45**, p. 30, 1959.
- VAUGHAN JONES, R., MCSWINEY, R. R., BROOKS, R. U., *Lancet*, **1**, 179, 1959.
- VOLTERRA, V., *Nature*, **118**, p. 558, 1926.
- VOLTERRA, V., *Mem. Accad. Lincei*, **2** (Ser. 6), p. 85, 1926.
- VOLTERRA, V., *R. C. Accad. Lincei*, **5** (Ser. 6), pp. 3, 61, 465, 1927.
- WEILER, E., *Brit. J. Cancer*, **10**, pp. 553-560, 1956.
- WIENER, N., *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. Wiley, N. Y., 1948.
- WOLSTENHOLME, G. E. W. et al. (Editors), *Ciba Foundation colloquia on ageing*, Vols. 1-4, Churchill, London, 1955-1958.

# Les sciences juridiques devant l'automation

De la mécanisation de la documentation juridique  
à la machine à dire le droit <sup>(1)</sup>

par Lucien MEHL,

*Maitre des requêtes au Conseil d'État,  
Directeur des stages à l'École Nationale d'Administration (Paris)*

---

## II.— LA DÉTERMINATION DES CONCEPTS DE BASE ET DE LEURS RELATIONS

Les concepts de base sont des notions juridiques regardées comme élémentaires et dont les combinaisons sont aptes d'une part à caractériser tout constituant — présent ou à venir — du système documentaire considéré, d'autre part à exprimer toute question susceptible de se poser dans le cadre de la discipline qui fait l'objet de la documentation en cause, avec une précision jugée suffisante eu égard au volume et à la structure de cet ensemble.

La détermination des concepts élémentaires constitue, sans doute, la partie la plus délicate du travail préparatoire à la mécanisation de l'information juridique. C'est là d'ailleurs une observation valable, en général, dans toute recherche scientifique ou technique : la difficulté est beaucoup moins de raisonner à partir des concepts que d'élaborer ceux-ci, moins de résoudre le problème que de le poser en termes clairs et précis.

Mais surtout, comme le souligne C. N. Mooers <sup>(2)</sup>, l'obstacle majeur à des développements satisfaisants dans le domaine de la

---

(1) La première partie de cet article a paru dans *Cybernetica* Vol. III, n° 1, 1960.

(2) *Some mathematical fundamentals on the use of symbols in information retrieval*, communication présentée à la Conférence internationale sur le traitement mécanique des informations, UNESCO, Paris, juin 1959.

recherche documentaire (*information retrieval*) est le manque d'un modèle, d'une théorie ou d'une représentation adéquate de *l'objet final de l'information*. La théorie de l'information, en dépit de son nom apparemment prometteur mais en réalité fallacieux, nous apporte peu de lumière en ce domaine. Et C. N. Mooers rappelle que Shannon dans l'introduction de son étude, intitulée *Théorie mathématique de la communication*, avait averti ses lecteurs en ces termes : « Fréquemment les messages ont un sens c'est-à-dire qu'ils se réfèrent ou sont liés, suivant un système donné, à des entités physiques ou corporelles : ces aspects sémantiques de la communication ne concernent pas le problème technique (*engineering problem*) ». Malheureusement conclut C. N. Mooers, le problème de la signification des symboles ne peut être ignoré dans la recherche documentaire.

A) *Insuffisance des mots-clefs du vocabulaire usuel.*

1<sup>o</sup>) Mais pourquoi forger des concepts, pourquoi opérer sur des symboles, alors que le vocabulaire juridique usuel nous offre un système sémantique hautement élaboré par les millénaires de la pratique du droit et de la recherche doctrinale ?

Il existe, en effet, dans le vocabulaire juridique des expressions fondamentales, des idées directrices qui constituent les mots-clefs des tables, des recueils de droit, établies en vue de faciliter les recherches.

Qu'il s'agisse de la constitution même de la machine (de l'organisation de sa mémoire notamment) ou de son utilisation, l'idéal, du point de vue de la simplicité et de l'efficacité, serait évidemment de pouvoir utiliser, d'emblée, ce glossaire qui a le mérite de résulter d'une exploration de la matière juridique, empirique certes, mais profonde et appuyée sur l'expérience. En fait, il peut être mis en œuvre dans certains systèmes à sélection optique qui ont l'immense avantage de ne point exiger un langage classificatoire rigoureux et de pouvoir intégrer facilement de nouvelles notions.

2<sup>o</sup>) Cependant, l'on est conduit, pour diverses raisons, à des investigations plus poussées dans la terminologie et la classification.

a) Il faut souligner tout d'abord que, quel que soit le matériel mis en œuvre, le vocabulaire usuel ne peut être utilisé sans un minimum de précautions qui conduisent à des investigations critiques assez poussées.

Le vocabulaire juridique est, en effet, souvent équivoque. C'est ce qu'on constatera pour le mot *droit* lui-même, qui, en français, peut désigner aussi bien la science juridique qu'une faculté ou prérogative, ou encore, certains impôts. Cette diversité des sens du mot *droit* conduit à le rejeter du champ des concepts utilisables ou tout au moins à lui assigner une valeur sémantique unique. Le mot *acte* est également équivoque. Il désigne soit l'opération juridique (*actum juris*), soit le document juridique (*instrumentum juris*), etc..

En outre, la langue du droit est encombrée de synonymes, par exemple : offre et pollicitation. Ces synonymes peuvent d'ailleurs comporter des nuances imprécises et dont l'utilité est parfois contestable. Nous citerons, par exemple : péremption, déchéance, forclusion et prescription ; ou encore, annuler, rapporter, rescinder. Le vocabulaire juridique prend parfois un tour paradoxal. En français, les membres d'une société sont des associés, mais les membres d'une association sont des sociétaires. On aperçoit déjà qu'il est indispensable de donner aux mots employés une signification non équivoque et d'éliminer les synonymes. En d'autres termes, il doit exister une correspondance bi-univoque entre le mot-signe employé et la chose ou la notion signifiée.

b) Même si l'on utilise un procédé manuel ou optique, on a évidemment intérêt à étudier de près les mots-clefs afin de diminuer l'encombrement du fichier ou du support employé, d'augmenter sa capacité et son efficacité. Beaucoup de mots du vocabulaire usuel, porteurs d'une très grande quantité d'information, sont aisément décomposables en leurs notions constituantes qui se retrouvent à l'état simple ou composé dans d'autres expressions. Il y aura souvent intérêt à procéder à de telles décompositions.

c) Les systèmes à fiches trouvent d'ailleurs leurs limites assez vite si l'ordre de connaissances considéré revêt une certaine ampleur. Il semble que ces systèmes seraient relativement efficaces pour le droit fiscal par exemple, mais qu'ils cesseraient d'être maniables, si l'on voulait y intégrer plusieurs branches du droit. En outre, les possibilités de combinaisons qu'ils offrent, sont limitées à des produits logiques. Or, nous verrons qu'il est important de pouvoir opérer sur des combinaisons de sommes et de produits logiques. Si l'on décide alors d'utiliser un ensemble mécanographique ou électronique, la recherche méthodique des concepts de base permet de simplifier la structure des connexions de la machine, de mieux utiliser sa capacité de mémoire, ce qui



est essentiel du point de vue de la rapidité de la performance et surtout du coût. Dès l'instant qu'on utilise des engins complexes, il ne paraît pas possible d'échapper à l'étape intermédiaire qui est celle du langage classificatoire <sup>(1)</sup>.

C'est d'ailleurs à cette même conclusion qu'aboutissent la plupart des chercheurs dans le domaine de la sélection automatique des données. « Les procédés de sélection qui ont le meilleur avenir, dit E. de Grolier, feront appel à une terminologie normalisée et logicisée, dénommant les notions complexes à l'aide d'éléments significatifs, correspondant à leurs composants simples, associés par combinaison » <sup>(2)</sup>.

Appliquée au droit, la recherche d'un tel langage ouvre d'ailleurs des perspectives sur la structure des systèmes juridiques et les cheminements de la pensée en ce domaine.

B) *Les concepts de base : caractéristiques et portée de cette notion.*

1<sup>o</sup>) Le problème des concepts de base se pose en effet dans toute discipline, non seulement parce qu'il est lié au problème pratique de la classification et de *l'information retrieval*, mais aussi parce que la recherche de sa solution est de nature à conduire à une analyse plus fine des systèmes de connaissances en cause, des relations entre leurs éléments, à la découverte des analogies, des isomorphismes et des invariants.

Il s'agit comme le précise Gardin <sup>(3)</sup> « de réduire les représentations globales, dans les domaines de référence envisagés, à des combinaisons d'éléments que l'on s'efforce de dégager en nombre aussi restreint que possible, par une analyse sans cesse raffinée des phénomènes ». On utilise ainsi, ajoute Braffort <sup>(4)</sup>, la notion abstraite de *structure* au sens de la théorie des ensembles telle qu'elle est présentée par N. Bourbaki. Une structure se présente alors comme une combinaison de concepts ; on peut déterminer entre

---

(1) Sauf progrès technique décisif, le système photonique de Lolquin semble pouvoir simplifier, sinon supprimer cette étape (Compte-rendu, Académie des Sciences, n° 4, 25 janvier 1960, p. 659).

(2) *Les progrès et l'avenir du « langage classificatoire »*, Bull. de l'Union Française des organismes de documentation, sept.-oct., 1958, n° 5, p. 14.

(3) Conférence donnée à l'Unesco en juin 1959 par Gardin qui a établi les éléments fondamentaux d'un langage classificatoire applicable aux vestiges archéologiques et notamment, aux outils et aux vases.

(4) Même conférence.

les structures des relations d'ordre, définir une structure-produit à partir de deux ou plusieurs structures déjà définies, associer, s'il en est besoin, concepts et structures à des données numériques.

Ces principes très généraux sont immédiatement transposables en droit. Institutions et procédures juridiques sont des structures, faites de combinaisons de concepts fondamentaux ou des structures de structures parfois associées à des données quantifiées (le nombre, le temps, l'espace, la valeur, etc.).

20) Les premières recherches entreprises dans le domaine du droit laissent espérer la possibilité d'évoquer avec un nombre peu élevé de concepts élémentaires bien choisis, et convenablement combinés, toutes les institutions et situations juridiques. Telle est la conclusion à laquelle est parvenu Aurel David à la suite de ses recherches sur les concepts de base du droit civil. Nous pensons aboutir au même résultat, à la suite d'investigations que nous avons entreprises en droit fiscal.

a) Une telle possibilité, qui fait d'ailleurs écho à des constatations de même nature faites dans d'autres domaines de la connaissance, revêt un grand intérêt non seulement sur le plan théorique, puisqu'elle révèle une structure fortement logique, parfois cachée, de la pensée juridique, mais aussi sur le plan pratique, car la réduction à l'élémentaire des concepts fondamentaux permettra d'accroître la simplicité, la rapidité et l'efficacité de la machine employée pour la recherche de l'information.

b) La possibilité de procéder à l'élaboration d'un très grand nombre de notions complexes avec un petit nombre de concepts de base comporte d'ailleurs un fondement mathématique. On peut l'exprimer d'une manière plus rigoureuse en s'appuyant sur la loi exponentielle de l'information : les données, notions, situations ou problèmes susceptibles d'être exprimés avec des concepts de base, affirmés ou niés, croissent suivant une double fonction exponentielle, lorsque le nombre des concepts croît en progression arithmétique.

Ainsi avec deux concepts de base affirmés ou niés, on peut construire 4 combinaisons logiques :  $2^2$ , soit en numération binaire : 00, 01, 10, 11. Ces combinaisons peuvent elles-mêmes être associées pour former 16 fonctions logiques  $(2)^{2^2}$ , soit en binaire :

	00	01	10	11
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

Considérons par exemple les deux concepts binaires homme-femme (H,F) et célibataire-marié (C,M). Il existe quatre combinaisons possibles de ces deux concepts

FC    HC    FM    HM

soit, en écriture binaire

00    10    01    11

Ces concepts peuvent se combiner entre eux pour former 16 fonctions logiques qui s'expriment par quatre chiffres binaires. Dans ce système de fonctions, le concept *homme* s'écrit

0 1 0 1

et le concept *femme*

1 0 1 0

L'ensemble des célibataires est représenté par la fonction

1 1 0 0

et des mariés (hommes ou femmes) par

0 0 1 1

L'ensemble des hommes célibataires et des femmes mariées s'écrit

0 1 1 0

Tout le monde, sauf les hommes célibataires, s'écrit

1 0 1 1

etc...

Avec 3, 4, 5, 6 concepts de base, on obtient le tableau suivant :

<i>concepts de base</i>	<i>combinaisons logiques</i>	<i>fonctions logiques</i>
3	$2^3 = 8$	$2^8 = 256$
4	$2^4 = 16$	$2^{16} = 65.536$
5	$2^5 = 32$	$2^{32} \approx 4.10^9$
6	$2^6 = 64$	$2^{64} \approx 16.10^{18}$

On voit avec quelle rapidité croît le nombre des fonctions logiques quand le nombre des concepts de base s'élève de quelques unités.

Sans doute, certaines fonctions, surtout lorsque le nombre des concepts de base est assez élevé, peuvent être dépourvues de signification. Mais si les concepts de base sont bien choisis, le système de fonctions logiques sera utilisé au maximum.

c) Mais jusqu'où faut-il aller dans l'élémentaire pour le choix des concepts ? A la limite, comme le fait remarquer plaisamment E. de Grolier, on pourrait n'en retenir que deux : l'être et le néant. Il n'est évidemment pas question de descendre à ce degré d'abstraction métaphysique et il faut même rester très en-deçà. Il importe en effet, qu'en pratique, les concepts élémentaires choisis ne s'éloignent pas exagérément des notions juridiques usuelles, (dont certaines sont d'ailleurs fort abstraites). Nous essaierons de préciser ce point essentiel en abordant la nature des concepts.

Mais il faut dès maintenant souligner le caractère relatif de la notion de concept de base : l'analyse conceptuelle devra être plus fine si l'on désire une grande précision, si l'on cherche à mécaniser un très vaste domaine. Pour la machine à documentation, on peut se contenter d'une analyse peu poussée alors que la machine à consultations est plus exigeante.

En tout cas, concept élémentaire ne signifie pas concept rudimentaire. Le concept élémentaire exprime parfois une notion extrêmement riche et suggestive, et il a très souvent de fortes affinités avec ses congénères. On peut le comparer, dans le domaine de la chimie, à l'atome, qui, dans sa constitution intime, n'est pas moins complexe que la molécule, si l'on se borne à considérer celle-ci comme une structure d'atomes.

3°) Essayons maintenant de préciser quelle pourrait être la nature des concepts. Pour cela, l'on peut se guider au moyen de quelques principes directeurs.



a) Il est tout d'abord évident que les concepts doivent être choisis en fonction des éléments constitutifs des problèmes qui peuvent surgir dans l'ordre de connaissances considéré, des questions qui s'y poseront et non en fonction de la solution ou de la réponse qui doit être réputée inconnue, même si le chercheur ou le consultant en a quelque idée. Par exemple, en matière fiscale, les concepts devraient comporter, entre autres, certaines notions caractéristiques du fait fiscal (personnes assujetties à l'obligation fiscale, matière imposable, fait générateur, etc...) mais non pas en règle générale, les catégories d'impôts, les modalités d'imposition ou les tarifs qui sont, tout au moins dans la plupart des cas, la réponse cherchée (la question pouvant être présentée sous cette forme : à quelle *cédule*, suivant quelles *modalités* et à quel *taux* est imposée une personne qui fait telle opération dans telles conditions ?).

Cette règle pratique, d'ailleurs reliée à des points de vue théoriques qui tiennent à la structure même de l'ordre de connaissances considéré, est évidemment une condition essentielle d'efficacité de la procédure de *l'information retrieval*, en matière juridique surtout.

b) On peut maintenant se demander ce que vont représenter ces concepts. S'agira-t-il de notions abstraites et dépouillées ou, au contraire plus concrètement, d'êtres juridiques simples, d'opérations juridiques fondamentales ?

La réponse semble devoir être nuancée. Pour les besoins de la machine à documentation, il semble qu'il y ait intérêt à retenir des notions suffisamment concrètes. Une machine à consultations, opérant des raisonnements juridiques, aurait besoin, semble-t-il, de concepts plus abstraits.

Mais qu'il s'agisse de l'une ou de l'autre, il paraît impossible en tout cas, de se dispenser de faire usage de notions générales et abstraites qui correspondent à une certaine structure de la connaissance, à certaines modalités de la pensée qu'on retrouve notamment en droit : la personne, l'objet, le but, l'acte, le changement, le résultat, le temps, le commencement, la fin, l'espace, l'union, la séparation, etc...

Ces notions abstraites seront soit des concepts qui se combineront à d'autres pour les préciser, soit des catégories qui grouperont des concepts de nature plus concrète et qui caractériseront la structure des questions et celle de la mémoire de la machine. Nous sommes ainsi amenés à étudier les relations susceptibles de s'établir entre les concepts.

C) *Les relations entre les concepts de base.*

Nous considérerons successivement le problème de la hiérarchie des concepts, puis celui des relations syntactiques entre concepts de même rang.

1<sup>o</sup>) Si une certaine hiérarchisation des concepts comporte des avantages, il faut cependant éviter d'adopter un système comportant de nombreux niveaux hiérarchiques.

a) Une structure arborescente des concepts de base conduit en effet à leur répétition aux niveaux hiérarchiques parallèles et oblige, en outre, à suivre une certaine filière pour la consultation qui comporte alors des risques d'erreurs d'aiguillage. C'est cet inconvénient qu'on rencontre lorsqu'on consulte la table analytique d'un recueil établie suivant une classification logique qui implique une certaine hiérarchie. On retrouve d'ailleurs la même difficulté toutes les fois qu'on cherche à situer un élément dans un système de classification d'après ses caractéristiques (tel est le cas, notamment, lorsqu'on veut identifier une plante inconnue avec une flore).

Dans les ouvrages de droit ou autres, on tend à limiter ces difficultés en constituant des tables alphabétiques détaillées. Mais celles-ci prennent alors un très gros volume, car les mots-directeurs doivent y être répétés. Considérons par exemple le droit des sociétés. Pour *chacune* des rubriques : société en nom collectif, société en commandite simple, société à responsabilité limitée, nous trouverons dans la table analytique des sous-rubriques : *constitution, dissolution, prorogation*, etc... Mais chacune de ces sous-rubriques figurera, en tant que mot-directeur, à sa place alphabétique ou logique dans la table, les mots-directeurs dénommant les types de sociétés devenant à leur tour des sous-rubriques. On lira, par exemple :

Dissolution de société :

*société en nom collectif*  
*société en commandite simple*  
*société à responsabilité limitée*

Il apparaît donc que même si les mots-directeurs n'étaient répartis seulement qu'en rubriques et sous-rubriques, la table comporterait pour  $m$  mots, à supposer que toutes les combinaisons fussent valables,  $m(m-1)$  lignes. Avec en plus, des hypo-sous-rubriques, on aurait  $m(m-1)(m-2)$  lignes. Une classification épuisant toutes les combinaisons aurait (théoriquement)  $m$  lignes.

On voit donc que si, à la différence de ces tables, le clavier de la machine ne comporte qu'une seule touche par concept et que si les concepts définissant la question peuvent être pris dans n'importe quel ordre, la simplification est considérable. Dans ce cas, l'opération de sélection est rendue commutative. La machine supprime le labyrinthe de la recherche.

En outre, en faisant usage d'un nombre de concepts moindre que le nombre de concepts définissant le problème posé, on obtient des renseignements sur les situations plus générales. En remplaçant un concept par un autre, on obtient des renseignements sur les situations voisines, etc...

b) Un autre inconvénient des systèmes entièrement hiérarchisés est que non seulement les classes principales mais aussi la plupart des sous-classes étant établies à l'avance, les éléments à venir du système documentaire doivent, en principe, s'insérer dans les compartiments existants et le classement sera parfois artificiel. On peut, dans une certaine mesure, créer de nouveaux compartiments, mais seulement à condition de respecter la classification préétablie, ce qui sera parfois difficile. Il peut aussi arriver qu'un document soit susceptible d'être inscrit dans plusieurs compartiments. C'est pourquoi les systèmes à caractéristiques indépendantes sont généralement préférables.

c) Est-ce dire qu'il faut renoncer à toute hiérarchisation des concepts ? Nous ne le pensons pas.

En effet, la mise en œuvre de catégories fondamentales est conforme à notre manière de penser (division des problèmes en catégories fondamentales et dans chacune d'elles, examen des sous-questions). Mais il importe que le nombre des catégories fondamentales soit faible et, qu'en outre, soit évitée une cascade de sous-rubriques. Il est souhaitable de se limiter à un nombre de catégories premières qui soit de l'ordre de la dizaine, et à une ou deux sous-classes. On peut d'ailleurs par divers artifices (et notamment par l'emploi de concepts binaires) éviter la répétition sur le clavier de la machine (ou sur la carte perforée support de la question) de certains lots de sous-concepts, ce qui accroît la capacité de la machine et du support.

On aboutit donc à une solution de compromis qui consiste à adopter une seule catégorie de concepts fondamentaux correspondant à la structure-type des questions posées. A l'intérieur de chaque catégorie existe un lot de concepts correspondant à des genres eux-mêmes divisés en espèces. On a donc au plus trois niveaux hiérarchiques.

2°) Mais les relations entre les concepts du même rang peuvent être plus ou moins complexes.

a) On peut tout d'abord se borner à considérer des concepts de base positifs et limiter leurs combinaisons à l'intersection, c'est-à-dire au produit logique.

Soit par exemple la question : les plus values (Pv) sur matériel (M) constatées à la suite d'une fusion (F) entre une société anonyme (Sa) et une société à responsabilité (Sarl) opérée à la date (D) du 2 juillet 1959 sont-elles imposables, à quel impôt et à quel taux ?

La question peut être regardée comme le produit des concepts en cause (à supposer qu'il s'agisse bien de concepts de base)

Pv. M. F. Sa. Sarl. D 20759

Mais on peut concevoir un système qui acceptant des sommes ou des différences logiques (disjonction) permette d'exprimer des notions permanentes plus complexes ou des situations évoquant avec plus de précision le cas considéré et de mieux ajuster les questions. Considérons, par exemple, la question suivante : les plus-values (Pv) sur immobilisations (J) autres que les terrains (T) constatées à la suite d'une fusion (F) ou d'une scission (S) mais non d'un apport partiel d'actif (Ap) entre des sociétés autres que des sociétés de personnes (Sp), et à l'exclusion des sociétés à responsabilité limitée (Sarl) opérée entre le 20 juillet 1958 et le 30 juillet 1959 sont-elles imposables ?

Pv (J - T) (F + S - Ap) ( $\overline{\text{Sp}}$  - Sarl) (D 20759 - D 20758) ?

La question comporte alors, outre des produits, des sommes et des différences logiques.

Il est d'autant plus opportun de prévoir cette possibilité, au moins en ce qui concerne les sommes, que d'après les études statistiques de Fred Whalrey <sup>(1)</sup>, les types de questions ne comportant qu'un produit logique, du type A. B. C. ... ne se présentent que dans 21,4 % des cas alors que les questions comportant à la fois des sommes et des produits logiques, par ex. A (B + C...), surviennent dans 44,8 % des cas, la différence logique étant en pratique négligeable (1,4 %). « Ces résultats ne sont donc pas favorables, conclut logiquement E. de Grolier, à des systèmes de recherche de docu-

<sup>(1)</sup> Communication présentée à la Conférence internationale sur l'information scientifique, Washington, nov. 1958.



ments qui sont surtout adaptés à des multiplications logiques, comme les fiches à sélection visuelle par superposition » (1).

Il faut noter toutefois que les combinaisons entre les catégories fondamentales qui sont, en quelque sorte, les éléments nécessaires de la question, ne se font, en principe, que par produits logiques.

b) La question des combinaisons de sommes et de produits logiques n'épuise pas le problème de la syntaxe des concepts. Il importe, dans certaines circonstances, de pouvoir préciser dans la question posée la fonction précise du concept dans la combinaison considérée.

Par exemple le produit logique, Vente, Immeuble, Association, Société anonyme, ne permet pas de savoir si c'est l'association qui vend l'immeuble à la société anonyme ou le contraire. Pour le préciser il faut, ou bien assigner un ordre aux concepts, ce qui n'est pas en principe la solution la plus commode, ou bien les décliner. Il semble, qu'en droit fiscal, on puisse se contenter d'un cas sujet et d'un cas régime, c'est-à-dire de concepts binaires. Par exemple, le signe *I* sera affecté au concept personnes (individus, associations, sociétés, etc...) se livrant à une opération (quelle qu'elle soit : vente, prestation de service, louage d'ouvrage, etc...) qui entraîne pour elles une recette et le signe *O* aux mêmes personnes se livrant à des opérations qui entraînent pour elles une dépense. On peut dire plus simplement : partie prenante et partie versante.

Ces concepts binaires positifs-négatifs sont souvent avantageux, car fréquemment les notions juridiques vont par paire, dont les éléments sont exclusifs l'un de l'autre : homme-femme, étranger-national, plus-value-moins-value, etc...

Les concepts binaires ont l'avantage de se prêter, non seulement à un codage commode, mais aussi de se combiner avec d'autres séries de concepts qui n'ont pas à être répétées dans la mémoire de la machine. Par exemple, pour le concept « personne soumise à une obligation fiscale », on n'aura qu'une seule liste des diverses personnes physiques ou morales, qu'elles soient parties prenantes ou parties versantes. Dans le cas du concept « valeurs reçues ou cédées », on n'aura qu'une seule liste de ces différentes valeurs, ces listes étant elles-mêmes des séries de concepts élémentaires ou composés. Il faudra parfois user de concepts ternaires, quaternaires, etc... Leur formation ne comporte pas de difficultés (2).

---

(1) *Les progrès et l'avenir du « langage classificatoire »*, op. cit.

(2) Voir deuxième partie dans un prochain numéro de *Cybernetica*.

3<sup>o</sup>) En définitive le système de concepts qui paraît le plus acceptable dans le domaine de la recherche documentaire en droit paraît être le suivant : des catégories représentant des concepts fondamentaux, l'articulation même de la pensée, la structure du phénomène juridique dans la branche du droit considérée. A l'intérieur de chaque catégorie, on trouve des genres eux-mêmes divisés en espèces. Là s'arrête la subdivision. Mais chaque concept ou sous-concept est binaire, c'est-à-dire qu'il comporte un cas-régime et un cas-sujet. La combinaison des concepts s'opère suivant la règle de la logique des classes.

Le système ainsi défini, qui ne peut évidemment être regardé que comme une hypothèse de travail, s'applique à une branche du droit déterminée. Mais il paraît évident que si l'on opérait ensuite sur l'ensemble du droit, on retrouverait un grand nombre de concepts communs aux différentes branches. Il ne paraît pas déraisonnable d'espérer obtenir à la fin des investigations un système unique de catégories fondamentales et un lot de concepts juridiques universels.

D) *L'élaboration des concepts de base : sujétions et avantages.*

Mais il faut reconnaître que l'élaboration des concepts de base n'est pas une entreprise aisée. Elle exige l'exploration et l'analyse méthodiques de la littérature juridique dans la branche du droit considérée.

1<sup>o</sup>) Il convient, en première approximation, d'utiliser les mots-clefs des recueils et des tables, puis par approximations successives, par analyses de plus en plus fines, on obtient des concepts plus précis, tandis que la matière étudiée s'ordonne et que certains groupements se dessinent, préfigurant les catégories fondamentales.

La démarche suivie ne peut d'ailleurs être purement empirique. Il importe de choisir, dès le début des investigations, des idées directrices, des fils conducteurs pour l'élaboration des concepts, qu'on saura d'ailleurs abandonner, en cours de route, s'ils s'avèrent inadéquats. Il y a donc un constant échange entre empirisme et théorie.

2<sup>o</sup>) Dans certains cas, la décomposition en notions plus simples, tout au moins la première, est immédiate. On peut aisément remplacer *bail à loyer* par *contrat de louage d'immeubles*, expression qui constitue une association de termes plus simples, *statuts* par *contrat de société*, etc... Mais bien souvent les termes premiers seront innomés (c'est-à-dire non dénommés dans le langage cou-

rant). Il pourra être utile de les exprimer par des symboles, car leur expression en langage courant peut être assez longue. On constate, par exemple, en droit fiscal, que le mot *contribuable* qui a pour synonyme redevable ou assujetti, n'est pas un concept de base satisfaisant et qu'il peut y avoir intérêt à adopter la notion suivante : personne physique ou morale soumise à une obligation fiscale, soit à titre de partie prenante, soit à titre de partie versante. On voit d'ailleurs qu'il s'agit d'un concept binaire. En matière d'impôts sur les revenus, aux expressions profit, bénéfice, revenu, doit être préféré le concept binaire : valeur reçue ou cédée, ou correspondant à une plus-value ou moins-value d'actif (puisque en droit fiscal français, les plus-values sont en principe imposables).

De même le mot *mariage* n'est pas un concept de base. Il semble qu'il y ait lieu de retenir le concept *union* qui, associé à d'autres, évoquera le mariage, les fusions de sociétés, les regroupements de communes. On pourrait constater aussi qu'il existe un concept *division* (divorce, séparation de corps, fractionnement de communes, sécession de territoire, etc...) et un concept *cessation* (décès, cessation d'entreprise, dissolution de société, etc...).

3°) Un tel travail de recherche des concepts de base même limité à telle ou telle branche du droit peut paraître d'une envergure inquiétante. Il s'agit sans doute d'une œuvre de longue haleine qui pourrait occuper pendant un an ou deux une équipe de chercheurs travaillant à temps plein.

a) Mais ce travail serait néanmoins productif si l'on songe au temps qui serait ensuite économisé par les usagers de la machine (législateur, magistrats, fonctionnaires, entreprises, etc...)

Si, d'ailleurs, la machine documentaire est conçue de telle manière qu'elle porte en sa mémoire plusieurs branches du droit, elle peut apporter au chercheur un début de synthèse constructive de nature à faciliter la solution du problème posé.

En effet, alors que codes et recueils méthodiques, sont, par construction, analytiques, une telle machine, en opérant une série de sélections dans la masse des données dont elle dispose, va rapprocher des éléments de documentation souvent éloignés les uns des autres et permettre ainsi les comparaisons et les confrontations des solutions adoptées dans des domaines voisins ou parallèles, souligner les isomorphismes, les oppositions et parfois les incohérences.

En outre, l'affinement des notions que permet l'élaboration des concepts ouvre la voie, comme nous le verrons, à la machine à consultations juridiques.

b) La machine documentaire ainsi conçue permettrait aussi l'étude statistique de certains faits, notions ou problèmes en matière juridique. On pourrait lui demander, par exemple, quels sont les concepts qui reviennent le plus fréquemment dans telle ou telle catégorie de problèmes, quelles sont les notions litigieuses et celles, au contraire, dont l'application ne suscite pas de difficultés. La machine pourrait, d'ailleurs, être construite de telle manière qu'elle soit capable, sinon d'apprendre, du moins de répondre plus rapidement aux questions qui lui sont plus fréquemment posées.

c) Plus généralement, l'élaboration des concepts peut contribuer au perfectionnement de la science juridique, ne serait-ce que par la vertu heuristique d'une analyse conduite avec des procédés différents des méthodes traditionnelles des juristes. On aboutira, dans bien des cas, à la découverte de nouveaux concepts qui étaient en quelque sorte sous-jacents et qui ne pourront pas toujours être exprimés dans le vocabulaire usuel. On pourra découvrir aussi des relations profondes entre ces concepts et aboutir, par un cheminement progressif et parti du concret, à une axiomatique du droit susceptible d'être exprimée dans une logique symbolique.

C'est ainsi qu'Aurel David qui a poursuivi des travaux sur les fondements et la symbolisation du droit privé a pu ramener tous les contrats à la vente et à la location. D'où, une conception plus précise de ce qui est véritablement humain dans l'homme : sa force de travail, sa capacité intellectuelle ne font point partie de l'essence de la personne, puisque, sous certaines conditions, elle peut faire l'objet d'un contrat <sup>(1)</sup>. Nous sommes d'ailleurs parvenus à la même conclusion en analysant, en matière fiscale, la notion de revenu, qui, dans tous les cas, provient d'une source : le capital, qui peut être soit un bien matériel, soit les forces physiques ou les aptitudes intellectuelles de l'être humain.

On pourrait aussi grâce à une classification nouvelle des notions juridiques complexes, définir une « distance » juridique <sup>(2)</sup> entre ces notions et leurs voisinages, ce qui pourrait être très utile pour l'approfondissement du droit comparé et la traduction mécanique des ouvrages juridiques.

#### E) *Mesure de la valeur d'un système de concepts.*

Il résulte de ce qui précède que quelles que soient les bases

---

<sup>(1)</sup> DAVID Aurel, *La structure de la personne humaine*. Presses Universitaires de France.

<sup>(2)</sup> A l'instar de la distance entre les éléments d'une classification étudiée par Tanimoto pour les plantes.



théoriques sur lesquelles repose un système de concepts, il apparaît toujours comme un compromis exigé par la pratique.

Il est intéressant de pouvoir caractériser les traits fondamentaux du système et d'en mesurer la cohérence et l'efficacité à l'aide de critères précis que fournit l'approche logico-mathématique.

10) Les notions de généralité et de synonymie sont ici essentielles.

a) Avec Perry et Kent <sup>(1)</sup>, nous appellerons degré de généralité d'un concept, le rapport

$$Dg = \frac{n}{N}$$

où  $N$  est le nombre total des éléments (ou documents élémentaires : ici des articles de lois, des décisions de jurisprudence, des références à des études de doctrine, etc...) de l'ensemble documentaire considéré, et  $n$  le nombre d'éléments qui comportent le concept dont il s'agit.

b) Quel que soit par ailleurs le soin avec lequel on aura déterminé les concepts, il existera parfois un certain flou, soit entre les concepts, soit entre des termes constitués par des combinaisons de concepts (sommes, différences ou produits logiques de concepts).

Le degré de synonymie sera défini par le rapport

$$Ds = \frac{n'}{\frac{n_1 + n_2}{2}}$$

où  $n'$  est le nombre d'éléments auxquels les deux termes s'appliquent,  $n_1$  et  $n_2$  le nombre d'éléments auxquels le premier et le second terme s'appliquent respectivement.

20) Il est également possible de mesurer la sélectivité des systèmes en utilisant la logique des ensembles.

a) Si  $N$  est, comme précédemment, l'ensemble des documents du système considéré et  $x$  le nombre des documents recherchés en tant qu'ils sont utiles à l'usager de la documentation pour la solution du problème qu'il étudie, on a, en règle générale

$$\frac{x}{N} < 1$$

---

(1) *Documentation and information retrieval*, New-York, 1956.

La recherche a un caractère d'autant plus générique (ou au contraire spécifique) que  $\frac{x}{N}$  est plus grand (ou plus petit). Le rapport

$$Fg = \frac{x}{N}$$

définit donc le facteur générique.

b) On peut alors définir les critères de sélectivité.

Le but d'une recherche documentaire, notamment lorsque le critère générique est faible, est d'aboutir à un sous-ensemble  $m$  de  $N$  identique à  $x$  ou tout au moins ayant avec  $x$  de larges parties communes, problème qu'on peut topologiquement représenter ainsi (Fig. 1).

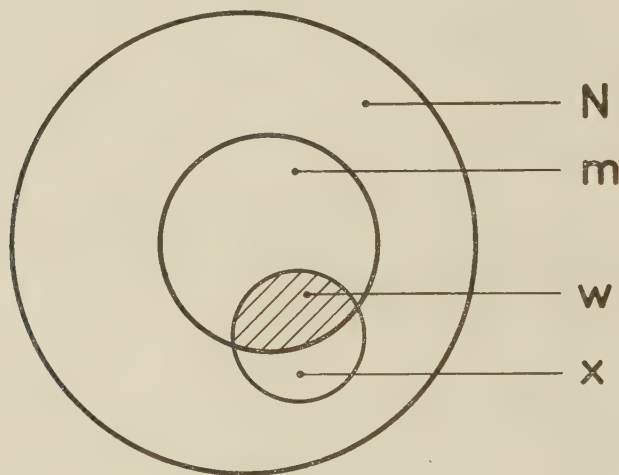


FIG. 1.

Pour apprécier l'efficacité du système documentaire considéré, on se sert des facteurs suivants également définis par Perry et Kent :

a) le facteur de rappel (*recall factor*)

$$F_r = \frac{w}{x}$$

où  $w$  représente le nombre de documents élémentaires qui, compris dans  $m$  sont également compris dans  $x$ , c'est-à-dire utiles eu égard au but qui motive la recherche.

$\beta$ ) le facteur de pertinence

$$F_p = \frac{w}{m}$$

$\gamma$ ) le facteur de résolution

$$F_{rs} = \frac{m}{N}$$

$\delta$ ) le facteur d'omission

$$F_{om} = \frac{x-w}{x}$$

$\epsilon$ ) le facteur de bruit (au sens de la théorie de l'information)

$$F_b = \frac{m-w}{w}$$

Le facteur d'omission et le facteur de bruit sont d'ailleurs les compléments à 1, respectivement du facteur de rappel et du facteur de pertinence. Ils constituent une autre manière d'exprimer ces derniers facteurs.

3<sup>o</sup>) La recherche est susceptible d'être conduite dans les conditions optimum si (Fig. 2)  $F_r$  et  $F_p$  sont égaux à 1,  $F_{om}$  et  $F_b$  étant alors nuls. Dans cette hypothèse, le chercheur n'a pas à se livrer à un examen intellectuel pour éliminer les éléments non pertinents.

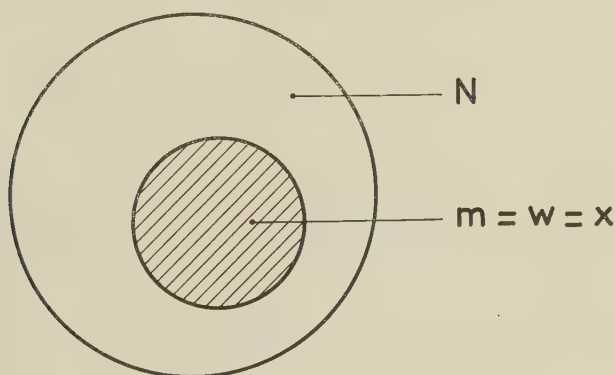


FIG. 2.

La recherche échoue totalement si  $w = 0$ . Dans ce cas,

$$F_r = F_p = 0$$

$$F_{om} = F_b = 1 \quad (\text{Fig. 3})$$

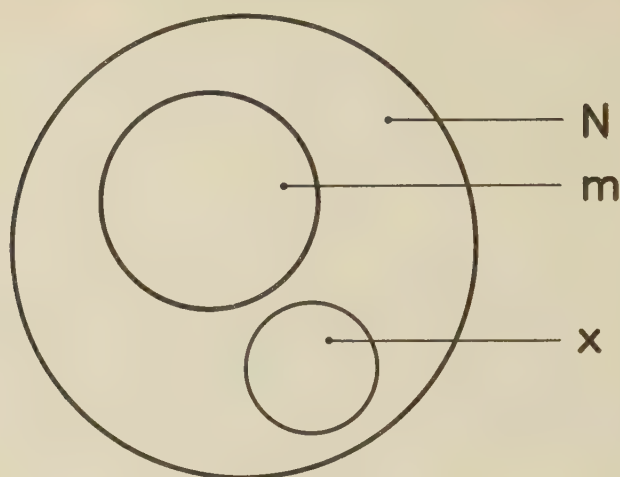


FIG. 3.

Il y a bien entendu toute une série de possibilités intermédiaires. Par exemple, dans le cas représenté à la figure 4, où  $x$ , égal à  $w$ , est entièrement contenu dans  $m$ , mais petit par rapport à ce dernier; on a une situation favorable quant au facteur de rappel ( $F_r = 1$ ), mais défavorable quant au facteur de pertinence qui est très faible. De même, si le facteur d'omission est nul, le facteur de bruit est élevé.

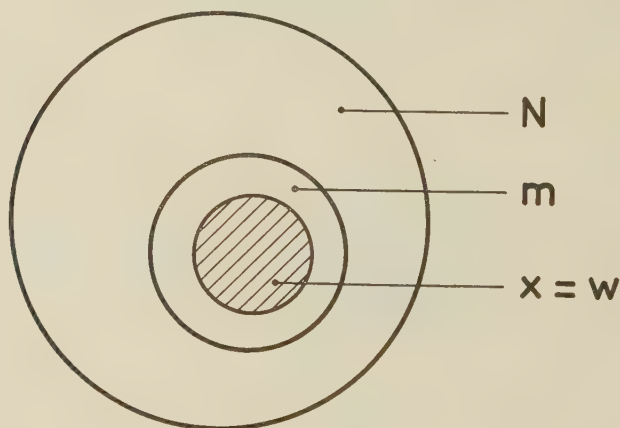


FIG. 4.

Ces considérations sur l'efficacité d'un système de concepts fournissent des données utiles pour la phase de réalisation de la machine documentaire que nous allons maintenant étudier.



## LA RÉALISATION DE LA MACHINE

Nous examinerons successivement les questions relatives au choix des techniques, aux travaux préparatoires à la constitution de la mémoire de la machine et enfin à l'organisation du service de documentation automatique.

## I — LE CHOIX DES TECHNIQUES

Après avoir énuméré les différents types de machines susceptibles d'être mises en œuvre et étudié le problème du contenu du document élémentaire, nous essaierons de donner quelques critères pour déterminer le niveau de l'équipement à adopter.

A) *Les types de machines.*

Toute machine capable d'opérer des sélections peut être adaptée à l'automatisation de la recherche documentaire.

1<sup>o</sup>) La première étape de la machine documentaire est le fichier de type classique : des lots d'information, au besoin codés, sont enregistrés sur des fiches qui sont classées et manipulées à la main sans l'utilisation d'aucun outil intermédiaire. Le fichier constitue un progrès sur le livre, le code ou la table. Il peut être aisément mis à jour par suppressions et additions et la classification peut être modifiée s'il en est besoin. On réalise ainsi la *mobilité* de l'information de base.

2<sup>o</sup>) La deuxième étape consiste à faire usage de fiches à perforations latérales (sélection par tringles), ou pouvant affecter toute la surface de la fiche (sélection optique). Le fichier peut alors être consulté sans que soit imposé un ordre rigide de mise en œuvre des concepts : la sélection est devenue *commutative*. Elle est aussi plus rapide. En outre, il n'y a pas lieu, en principe, de se préoccuper du reclassement des fiches qui peuvent être remises en vrac dans le fichier.

3<sup>o</sup>) Enfin on peut avoir recours à des procédés électro-mécaniques (sélection mécanographique) ou électroniques (calculateurs). La sélection devient ainsi *automatique* et l'on peut alors parler de machine à information.

B) *Le contenu du document élémentaire.*

Le contenu du document élémentaire varie suivant le procédé employé.

1<sup>o</sup>) On peut, en premier lieu, établir une carte ou un support, par unité de référence (article de loi, décision de jurisprudence, étude de doctrine). Les perforations de la carte (ou les imprégnations de la bande magnétique) correspondent aux caractéristiques essentielles, c'est-à-dire ici aux concepts de base mis en œuvre dans l'unité de référence considérée.

a) On voit que l'analyse de l'article de loi ou de la décision de jurisprudence sera le plus souvent très fine, étant donné la brièveté relative de ces textes. Elle sera en général moins déliée s'il s'agit d'une étude de doctrine (article, ouvrage ou partie d'ouvrage). D'une manière générale, on peut dire que la précision de l'analyse devra être liée à la hiérarchie des textes, à l'importance des règles contenues dans l'unité de référence considérée, à la complexité des combinaisons de concepts que celle-ci comporte.

b) Avec les systèmes à sélection manuelle, optique et même mécanographique, il est possible de faire figurer sur le document de base, carte ou microfilm, le texte législatif, ou la décision juridictionnelle, etc. On peut aussi se limiter à un résumé, ce qui sera obligatoire s'il s'agit d'un ouvrage, d'une partie d'ouvrage, ou même d'un article. Un calculateur électronique au contraire, ne donnera normalement que des références (imprimées en clair) et il faudra donc se reporter ensuite aux fichiers, codes, recueils, et ouvrages.

C'est là évidemment une sujétion qui peut d'ailleurs être réduite par de bonnes méthodes de classement et de manipulation des documents. Mais elle est en tout cas de caractère secondaire, car le problème essentiel est moins de fournir directement au chercheur les documents ayant trait à ses préoccupations que de lui faire connaître si ces documents existent et où ils se trouvent.

D'une manière générale d'ailleurs, comme le note E. de Grolier, il y a intérêt à dissocier l'enregistrement des documents et l'enregistrement des caractéristiques.

2<sup>o</sup>) On peut aussi employer la méthode qui consiste à utiliser une carte par notion fondamentale ou concept de base. Toute référence faisant état de la notion ou du concept considéré est définie par ses coordonnées et repérée sur la carte par une petite perforation. Pour retrouver la référence (texte ou décision) correspondant à un lot de concepts, on superpose les cartes relatives à ces concepts. La ou les références apparaissent, par contrôle optique, sous forme de points lumineux. L'avantage de ce système

est de ne pas nécessiter une systématisation rigoureuse des notions ou concepts, ni une codification complexe (système Selecto).

Bien que la capacité de ce système soit bien supérieure à celle des procédés de sélection manuelle, il ne peut être utilisé pour les vastes ensembles de documentation. Il a d'ailleurs l'inconvénient, nous l'avons vu, d'autoriser seulement l'emploi du produit logique pour la combinaison des concepts (conjonction), à l'exclusion de leur somme logique (disjonction).

### C) *Le niveau de l'équipement.*

Le niveau de l'équipement dépend de l'étendue du domaine juridique considéré et des exigences du service de documentation, compte tenu de la capacité d'information et de la vitesse de sélection des différents matériels.

1°) Nous rappelons d'abord les capacités respectives des différents supports d'information.

a) Les fiches manuelles à perforations latérales offrent pratiquement 100 positions.

Si l'on utilise seulement des produits logiques, elles permettent donc de mettre en œuvre 100 concepts de base. En fait, il s'agit là d'un maximum théorique, car certaines notions, pour être clairement définies et notamment celles relatives aux lieux, aux dates, aux valeurs quantifiées exigeront plusieurs perforations. Lorsqu'on veut utiliser non seulement des produits logiques mais aussi des sommes et des différences logiques de notions affirmées ou niées, le nombre des concepts de base susceptibles d'être mis en œuvre, si l'on prétend être à même d'utiliser toutes les combinaisons possibles, tombe à 6 environ (avec 128 perforations, on aurait 7). Le nombre des concepts utilisables augmente si on peut les grouper en séries autonomes correspondant à des catégories de concepts. Par exemple, on pourra mettre en œuvre 36 concepts binaires, s'ils sont susceptibles d'être divisés en 12 séries autonomes de trois concepts.

b) Mais il importe de souligner qu'en tout état de cause, l'utilisation des sommes logiques ne diminue pas la capacité réelle du document de base. Elle conduit seulement à utiliser des concepts de base plus affinés que dans l'hypothèse de la seule utilisation des produits logiques. Il faut cependant éviter qu'un trop grand nombre de combinaisons soient dépourvues de sens et par suite inutiles, d'où, en pratique, la nécessité de la création d'un mini-

mun de catégories fondamentales, nécessité que nous avons déjà soulignée.

c) Les fiches à sélection optique ont une plus grande capacité que les fiches à sélection manuelle (Ex. Filmorex,  $20 \times 28 = 560$  positions ; Kodak,  $42 \times 70 = 2.940$ ). Les possibilités du système Selecto semblent être du même ordre de grandeur. L'adoption de fichiers de ce genre constitue déjà un progrès décisif.

La capacité des fiches mécanographiques ordinaires est intermédiaire : 800 (soit  $80 \times 10$  positions).

d) Quant à la capacité des grands ensembles électroniques, qui, pour stocker l'information, utilisent notamment les bandes magnétiques, elle est pratiquement illimitée.

En effet, les informations contenues dans les 80 colonnes d'une carte perforée peuvent être enregistrées dans un centimètre de bande magnétique. Quelques bandes de ce genre qui, bien que longues de 700 à 800 mètres, sont facilement stockables, peuvent remplacer des fichiers mécanographiques de plusieurs mètres d'épaisseur. Cent bandes peuvent remplacer 7 millions de cartes perforées et certains calculateurs peuvent être équipés de 100 lecteurs de bandes. On peut d'ailleurs utiliser concurremment, s'il en est besoin, cartes perforées et bandes magnétiques, l'information contenue dans l'un de ces types de support étant aisément convertible dans l'autre.

2°) Si la mécanisation de la recherche documentaire exige qu'une très grande quantité d'information puisse être aisément stockée sous un faible volume, elle demande aussi, et plus encore, une sélection rapide. Si les procédés mécaniques ne permettaient, outre une sécurité plus grande, un gain de temps appréciable par rapport aux méthodes traditionnelles, l'adoption de tels procédés, eu égard à leur coût relativement élevé en investissements intellectuels et matériels, ne présenterait guère d'intérêt.

Mais il apparaît que pour un manipulateur expérimenté, le temps de recherche d'un document est beaucoup plus court, même avec des systèmes très simples comme la sélection par tringles, qu'avec les procédés traditionnels, à condition que le volume du fichier ne soit pas trop grand. On peut dire que pour une recherche présentant une certaine complexité le temps d'accès peut être deux ou trois fois plus court lorsque le système comprend 2 à 3.000 fiches. En effet, la sélection par tringles permet de trier 12.000 fiches à l'heure. La recherche d'un lot de documents dans un fichier de 3.000 éléments demande donc un quart d'heure au maximum.



La même recherche faite dans le même ensemble d'informations présenté dans une table ou un fichier purement manuel pourrait demander une demi-heure, en moyenne, compte tenu du fait que le chercheur devra suivre une certaine filière et consulter plusieurs zones du fichier ou de la table, lire plusieurs rubriques et extraits pour s'assurer qu'il n'omet pas une référence utile.

Mais, à partir de 5 à 6.000 références, le système de sélection par tringles n'offre guère que l'avantage de la sécurité. Il faut alors passer à la sélection optique qui permet de trier 36.000 fiches à l'heure, voire à la mécanographie, 60.000 fiches à l'heure.

Si l'on opère sur de très vastes ensembles d'informations, ce qui est nécessaire en matière juridique, ainsi que nous l'avons déjà souligné, la mécanographie s'avère elle-même insuffisante, comme le prouve, semble-t-il, l'essai tenté à la cour suprême de New Jersey (États-Unis) : la sélection portait sur 180.000 fiches de jurisprudence et l'attente (maximum) pouvait être de trois heures, nettement supérieure à celle découlant de la mise en œuvre des procédés traditionnels.

En effet, le temps de recherche manuelle n'est pas proportionnel au nombre de fiches, car, à la différence de la machine, le chercheur peut éliminer d'emblée, sans risque d'omissions graves, les investigations dans certaines zones du fichier.

Il est vrai qu'on peut faire de même avec un système mécanographique si l'on a pris soin de diviser le fichier en secteurs relativement homogènes et autonomes. Mais on se prive alors des possibilités de recoupements et de rapprochements automatiques entre les différents secteurs, ce qui était précisément un avantage de la mécanisation.

On voit donc que si le système d'information considéré dépasse 100.000 références, il faut employer des équipements autorisant des performances nettement plus élevées que celles des ensembles mécanographiques, c'est-à-dire les calculateurs électroniques.

La vitesse de sélection de ceux-ci est en effet sans commune mesure avec celle des ensembles mécanographiques. La lecture sur bande magnétique d'une quantité d'information équivalente à celle d'une carte perforée est de 100 à 500 fois plus rapide suivant le type de calculateur employé. En outre, nous avons vu qu'un calculateur peut lire simultanément un grand nombre de bandes. On peut aussi utiliser des mémoires à tambour ou à disques dont les performances sont plus remarquables encore et qui ont le mérite d'être « adressables ». Elles permettent de substituer à l'accès séquentiel qui caractérise les bandes magnétiques l'accès immédiat au seul renseignement cherché.

Comme ces mémoires sont plus onéreuses, il convient de combiner, comme on le fait dans les grands calculateurs, l'usage de plusieurs types de mémoires.

## II — TRAVAUX PRÉPARATOIRES A LA CONSTITUTION DE LA MÉMOIRE DE LA MACHINE

La constitution de la mémoire de la machine pose trois questions essentielles : l'élaboration des résumés des documents, l'indexation et le codage à partir des résumés, l'enregistrement des références dans la machine.

### A) L'élaboration des résumés.

1<sup>o</sup>) Qu'il s'agisse de la constitution de la mémoire de base de la machine ou de son alimentation en données nouvelles, il y aura lieu, en général, de procéder à un résumé préalable des documents.

Il importe, en effet, pour faciliter l'indexation, de résumer en langage juridique ordinaire, l'article de loi, la décision de jurisprudence, l'article de doctrine, la subdivision de tel ouvrage, etc.

Certes, lorsque le texte est court (tel peut être le cas d'un article de loi), on peut passer à l'indexation directement. Mais, en général, il faudra faire une synthèse préalable, celle à laquelle procèdent d'ailleurs les arrêtiistes avant la citation de la décision et le développement de leurs commentaires. Ce résumé devra être fait d'un point de vue objectif et général avec le soin de n'omettre aucun des aspects, car il faut que la référence au document puisse être retrouvée par tout utilisateur, quel que soit l'objet de sa « recherche »

2<sup>o</sup>) Comme il s'agit là d'un travail minutieux, astreignant, long et par suite coûteux, on a cherché à l'automatiser. C'est le problème de *l'automatic abstract*, du résumé automatique qui a trouvé un commencement de solution avec les travaux de Luhn <sup>(1)</sup>. On peut en effet confier au calculateur le travail de balayage (*scanning*) d'un texte, avec mission de repérer les phrases-clefs, en fonction d'un certain programme qui lui est assigné.

Toutefois le procédé ne fonctionne encore qu'à titre expérimental. Le repérage de phrases-clefs se fait évidemment au moyen de mots-clefs, supposés contenus dans le document. Si, en raison du vocabulaire employé, ces mots ne s'y trouvent pas ou s'y trouvent

---

(1) LUHN, H. P., *The automatic creation of literature abstracts*. IBM Journal of research development, n° 2, avril 1958.

rarement, le procédé peut échouer. En effet, une notion fondamentale peut être seulement implicite dans un développement.

On rencontrerait aussi des difficultés particulières en droit, étant donné l'ambiguïté du vocabulaire et la fréquence des notions implicitement mises en œuvre. Comme le souligne le professeur Bar-Hillel, «scanning is not reading with understanding». En d'autres termes, on n'a pas encore réalisé la machine capable de prendre des notes.

#### B) *L'indexation et le codage.*

1<sup>o</sup>) L'indexation consiste à transcrire la référence à enregistrer dans une combinaison de concepts de base. C'est là aussi une opération délicate, comme celle du résumé. L'indexation automatique se heurterait à des difficultés encore plus grandes que le résumé automatique, car les concepts de base étant souvent innomés, il n'y a guère de chance qu'ils puissent être extraits du résumé et combinés par une machine.

2<sup>o</sup>) Le codage est, en revanche, une opération très simple. Il consiste à transcrire la combinaison de concepts exprimant la référence dans un symbolisme intelligible pour la machine. Qu'il s'agisse d'une machine mécanographique ou d'un calculateur, l'enregistrement des références codées pourra se faire sur cartes perforées.

### III — L'ORGANISATION

#### DU SERVICE DE DOCUMENTATION AUTOMATIQUE

La mécanisation de l'information juridique conduit nécessairement à une certaine centralisation des services de documentation.

#### A) *Généralités.*

Avec des procédés manuels ou optiques, cette centralisation est limitée au travail de conception. Il est fait par une seule équipe spécialisée, ce qui constitue un «investissement intellectuel», les cartes pouvant être ensuite aisément reproduites et diffusées à des abonnés.

On peut encore concevoir une certaine décentralisation si l'on utilise des procédés mécanographiques, soit que des entreprises ou administrations utilisent des jeux de fiches préparés par un organe central, soit que des entreprises privées ou des administrations publiques organisent des centres de consultations juridiques équipés avec de telles machines.



Mais avec un calculateur électronique, la consultation elle-même est centralisée : étant donné le coût d'un tel appareil, l'automatisation de l'information juridique ne pourrait être entreprise qu'à l'échelon national, (ou tout au moins régional). La machine pourrait équiper un centre d'informations juridiques relié par téléscrip-teur, ou par tout autre moyen convenable, au parlement, aux principaux tribunaux, aux grandes administrations. Il fournirait en outre des consultations aux entreprises et aux particuliers. Son plein emploi serait ainsi assuré ; sa rentabilité serait certaine si l'on tient compte du temps de travail rendu disponible.

B) *L'organisation interne du service.*

L'organisation interne d'un service de documentation automatique pose des problèmes assez complexes.

1<sup>o</sup>) Même lorsque la mémoire de base de la machine aura été constituée, il faudra l'entretenir en y intégrant les textes nouveaux, les décisions nouvelles, les références aux ouvrages nouveaux. C'est là évidemment une sujétion importante. Ce travail ne pourra être confié qu'à des spécialistes car non seulement de nouveaux documents apparaissent, mais aussi les idées évoluent, de nouvelles notions surgissent qu'il faudra traduire en concepts de base, etc. Il ne faut pas d'ailleurs exagérer la difficulté car l'évolution des notions est relativement lente et l'innovation en matière juridique est souvent un nouvel assemblage de concepts anciens.

2<sup>o</sup>) Les questions qui parviendront en clair au centre devront aussi être indexées et codées par des spécialistes (<sup>1</sup>). Il sera souhaitable d'ailleurs de procéder à un certain groupage des questions afin d'aboutir à un emploi rationnel du calculateur, faire travailler simultanément, le cas échéant, des parties différentes de l'appareil et éviter, en revanche, de répéter les questions semblables.

3<sup>o</sup>) Le calculateur fournira une réponse qui sera, soit un texte, soit une référence. Dans cette dernière hypothèse (qui, nous l'avons vu, est sans doute la plus pertinente), il faudra se reporter matériellement aux ouvrages et documents. On peut concevoir une

---

(<sup>1</sup>) L'emploi de la machine supposera en effet un certain apprentissage. Son utilisateur devra connaître les concepts innommés et la manière de les combiner. Pour faciliter sa tâche, on pourra d'ailleurs adjoindre à la machine une table de définition des concepts innommés. On peut concevoir aussi un dictionnaire permettant de traduire les concepts usuels en combinaisons de concepts de base. Le mot dictionnaire évoque bien l'idée que l'utilisateur devra apprendre un nouveau langage.



automation plus complète, si le calculateur est combiné avec un mécanisme de recherche du document matériel dans la bibliothèque.

4<sup>o</sup>) Les textes sont ensuite transmis au demandeur par lettre, photocopie, téléphone, télécopieur, etc. On peut imaginer, dans l'avenir, l'envoi de renseignements télévisés. Le demandeur peut aussi se borner à demander des références et rechercher lui-même les textes s'il dispose d'une bibliothèque.

5<sup>o</sup>) Notons, enfin, qu'il serait évidemment important pour l'installation d'un système documentaire de procéder à une étude des coûts, comme le proposent Perry et Kent. Les facteurs du coût sont relatifs à l'emménagement des documents, au matériel de sélection, aux opérations (classement de documents nouveaux, recherches, reclassements, établissements des réponses et du codage, etc.). Il s'agit en somme d'une étude de recherche opérationnelle et d'une étude financière appliquées à la mécanisation de l'information, auxquelles il faudra nécessairement procéder pour arrêter définitivement le choix des objectifs, des techniques et des procédures.

Telles sont les indications, encore fort sommaires, que l'on peut donner sur la machine à documentation juridique. Elle n'est point encore réalisée, mais elle est du domaine du possible et même de l'avenir immédiat. Dans la deuxième partie de cet article <sup>(1)</sup>, nous examinerons le problème de la machine à consultations qui opère elle-même un véritable raisonnement. Elle ne sera sans doute créée et mise en service que dans un avenir plus lointain. Mais les problèmes théoriques et pratiques qu'elle pose sont d'un grand intérêt. Ce projet à long terme nous invite en effet à réfléchir dès maintenant, d'une manière nouvelle, sur la structure de la pensée juridique.

(à suivre)

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION. <sup>(2)</sup>

PREMIÈRE PARTIE : *L'automatisation de la documentation juridique.*

— De l'utilité de la machine documentaire en matière juridique.

— Les principes de la mécanisation de l'information juridique.

<sup>(1)</sup> Cette deuxième partie sera suivie d'une bibliographie générale sur l'*information retrieval*.

<sup>(2)</sup> Le début de cet article a paru dans *Cybernetica* Vol III, n° 1, 1960.

## I. — La mise en ordre de l'information.

- A) Lois et règlements
- B) La jurisprudence
- C) La doctrine
- D) La synthèse des sources d'information juridique

## II. — La détermination des concepts de base et de leurs relations.

- A) Insuffisance des mots-clefs du vocabulaire usuel
- B) Les concepts de base : caractéristiques et portée de cette notion
- C) Les relations entre les concepts de base
- D) L'élaboration des concepts de base : sujétions et avantages
- E) Mesure de la valeur d'un système de concepts

## — La réalisation de la machine.

## I. — Le choix des techniques.

- A) Les types de machines
- B) Le contenu du document élémentaire
- C) Le niveau de l'équipement

## II. — Travaux préparatoires à la constitution de la mémoire de la machine.

- A) L'élaboration des résumés
- B) L'indexation et le codage

## III. — L'organisation du service de documentation automatique.

- A) Généralités
- B) L'organisation interne du service

DEUXIÈME PARTIE : *L'automatisation du raisonnement juridique.*

Cette deuxième partie sera publiée dans un prochain numéro de *Cybernetica*.